



Αρ. Πρωτ. 1565
12-10-90

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΩΣ/ΕΜΠ-ΟΑΣΠ:

ΔΟΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ
ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ

Α' ΜΕΡΟΣ

ΕΡΕΥΝΑ ΕΜΠ/ΟΑΣΠ

"ΔΟΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ
ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ
ΕΝΤΑΣΗ"

Τ Ε Λ Ι Κ Η Ε Κ Θ Ε Σ Η

Θ.Π. Τάσιος - Α. Μπέζας - Μ. Μωρέττη
Σεπτέμβριος 1990

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Α' ΜΕΡΟΣ

- 1.- ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ
 - 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ
 - 1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΗΨΕΩΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΠ' ΤΗ ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ
 - 1.2.1 Πριν απ' τη ρηγμάτωση
 - 1.2.2 Μετά τη διαγώνια ρηγμάτωση
 - 1.2.3 Μετά τη γενίκευση της ρηγματώσεως
 - 1.3 ΚΥΡΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
 - 1.3.1 Διαγώνια εφελκυστική αστοχία
 - 1.3.2 Αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως
 - 1.3.3 Αστοχία λόγω λυγισμού των διαγωνίων οπλισμών
 - 1.4 ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ BERNOLLI-NAVIER ΝΑ ΠΕΡΙΓΡΑΨΕΙ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ ($\alpha_s \leq 1.0$)
 - 1.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ ΣΤΗΝ ΑΚΑΜΨΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ
 - 1.6 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ
 - 1.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ
 - 1.7.1 Τρόπος οπλίσεως των δοκών συζεύξεως
 - 1.7.2 Βαθμός συζεύξεως δοκών-τοιχωμάτων
 - 1.7.3 Εκτίμηση αλληλεπιδράσεως δοκών-τοιχωμάτων μέσω θεωρητικού προσομοιώματος.
- 2.- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ
 - 2.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
 - 2.1.1 Σκυρόδεμα
 - 2.1.2 Χάλυβας
 - 2.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ
 - 2.3 ΙΣΤΟΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ
 - 2.4 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ
 - 2.4.1 Βελόμετρα
 - 2.4.2 Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα

- 3.- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
- 4.- ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΣ
 - 4.1 ΔΟΚΙΜΙΑ 1Α,1Β (κλασική όπλιση)
 - 4.2 ΔΟΚΙΜΙΑ 2Α,2Β (δισδιαγώνιοι οπλισμοί)
 - 4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ 3Α,3Β (χιαστί οπλισμοί στα άκρα)
 - 4.4 ΔΟΚΙΜΙΑ 4Α,4Β (βλήτρα καθ'όλο το μήκος της δοκού)
 - 4.5 ΔΟΚΙΜΙΑ 5Α,5Β (βλήτρα στα άκρα της δοκού)
- 5.- ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ ΛΟΓΩ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΕΩΝ
- 6.- ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΛΟΓΩ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΕΩΝ
- 7.- ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ
 - 7.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
 - 7.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΚΦΡΑΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
 - 7.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ
- 8.- ΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- 9.- ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Β' ΜΕΡΟΣ

- 10.- ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ
 - 10.1 ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΙ
 - 10.2 ΔΙΑΓΩΝΙΟΙ ΟΠΛΙΣΜΟΙ ΔΟΚΩΝ CB-2
 - 10.3 ΧΙΑΣΤΙ ΟΠΛΙΣΜΟΙ ΔΟΚΩΝ CB-3
 - 10.4 ΒΛΗΤΡΑ
- 11.- ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΤΗΡΩΝ
- 12.- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

13.- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ

13.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΟΠΛΙΣΕΩΣ

13.1.1 Κλασική όπλιση (δοκοί CB-1)

13.1.2 Όπλιση με δισδιαγώνιους οπλισμούς (δοκοί CB-2)

13.1.3 Χιαστί οπλισμοί στα άκρα (δοκοί CB-3)

13.1.4 Βλήτρα (δοκοί CB-4,5)

13.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΣ

13.3 ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ

14.- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

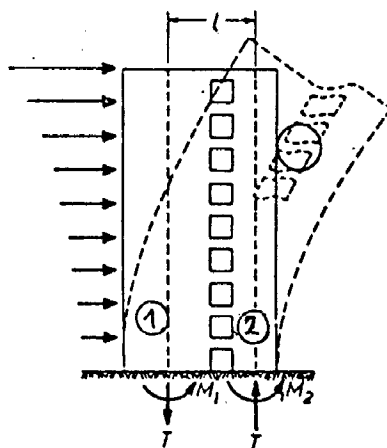
15.- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΑΛΙΑ ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ 19/7/88

1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ

"Δοκοί συζεύξεως" συνδέουν δύο γειτονικά τοιχώματα που χωρίζονται μεταξύ-τους με μία ή περισσότερες κατακόρυφες σειρές ανοιγμάτων (βλ. Εισαγωγή, 1ης Εκθ. Προόδου).

Κατά την επιβολή οριζόντιων φορτίων (σεισμός, άνεμος), το σύστημα των τοιχωμάτων τείνει να παραμορφωθεί όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1 [9].



Σχ. 1.1: Παραμορφώσεις συζευγμένου τοιχώματος που υποβάλλεται σε οριζόντια φόρτιση.

Η ροπή ανατροπής M_0 που αναπτύσσεται στις διάφορες στάθμες ενός συζευγμένου τοιχώματος λόγω της οριζόντιας φορτίσεως εξισορροπείται από τρεις εσωτερικές δράσεις. Οι δράσεις αυτές φαίνονται στο Σχ. 1.1 και είναι: α) μία καμπτική ροπή M_1 που ασκείται στο τοίχωμα 1, β) μία καμπτική ροπή M_2 που αναπτύσσεται στο τοίχωμα 2 και γ) αντίθετες αξονικές δυνάμεις T , που αναπτύσσονται σε κάθε τοίχωμα. Έτσι:

$$M_0 = M_1 + M_2 + T \cdot L \quad (I)$$

Σημειωτέον ότι εκάστη δύναμη T ισοδυναμεί με το άθροισμα των τεμνουσών δυνάμεων που η κάθε δοκός συζεύξεως μεταφέρει στα εκατέρωθεν τοιχώματα.

Επομένως, εάν επιθυμούμε την μικρότερη δυνατή καμπτική επιπόνηση του κάθε τοιχώματος, θα έπρεπε να διαθέτουμε δοκούς συζεύξεως μεταφέρουσες μεγάλη τέμνουσα δύναμη, δηλαδή μεγάλη απομείωση ροπής που δρα στο κάθε τοίχωμα.

Παράλληλα, σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις σχεδιασμού κατασκευών, τα συζευγνύμενα τοιχώματα καθευατά θα πρέπει να είναι τα τελευταία στοιχεία της κατασκευής που θα υποστούν βλάβες. Αυτό σημαίνει ότι προτού διαρρεύσει κάποιο τοίχωμα, θα πρέπει όλες οι δοκοί συζεύξεως καθύψος της κατασκευής να έχουν αναπτύξει πλήρως την αντοχή-τους. Για να συμβεί όμως κάτι τέτοιο, είναι φανερό [9] ότι ορισμένες απ' τις δοκούς (οι χαμηλότερες) θα πρέπει να υποστούν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις.

Για να είναι λοιπόν δυνατή αυτή η α θ ρ ο ι σ τ ι - κ ή λειτουργία, πρέπει οι δοκοί συζεύξεως να είναι σε θέση να μεταφέρουν μεγάλες τέμνουσες δυνάμεις και να υποστούν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς να χάνουν τη φέρουσα ικανότητά-τους. Απαιτείται δηλαδή μεγάλη πλαστιμότητα δοκών συζεύξεως.

Δυστυχώς, οι απαιτήσεις αυτές δεν είναι εύκολο να ικανοποιηθούν από τις δοκούς συζεύξεως διότι λόγω της μορφής-τους (μικρός λόγος διατμήσεως) έχουν την τάση να συμπεριφέρονται ψαθυρά. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος μήκους l προς ύψος h των δοκών συζεύξεως, τόσο μεγαλύτερη τέμνουσα V αναπτύσσουν αλλά και τόσο πιο ψαθυρά συμπεριφέρονται (όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα κοντά υποστυλώματα).

Ο λόγος διατμήσεως α_s των δοκών συζεύξεως (που θεωρούνται αμφίπακτες λόγω της μικρής-τους ακαμψίας συγκριτικά με την ακαμψία των τοιχωμάτων) είναι:

$$\alpha_s = \frac{M}{Vh} = \frac{V \cdot l/2}{Vh} = \frac{l}{2h}$$

Ο Paulay [2], αναλόγως με την τιμή του λόγου διατμήσεως α_s , κατατάσσει τις δοκούς συζεύξεως στις ακόλουθες κατηγορίες:

$\alpha_s \leq 0.50$	Κοντά στοιχεία
$0.50 < \alpha_s < 1.00$	Μεσαία στοιχεία
$1.00 \leq \alpha_s$	Κανονικές δοκοί

Για λόγους $\alpha_s \geq 1.00$ ο Paulay θεωρεί ότι οι δοκοί συζεύξεως συμπεριφέρονται όπως οι κλασικές δοκοί.

1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΗΨΕΩΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΠ' ΤΗ ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ.

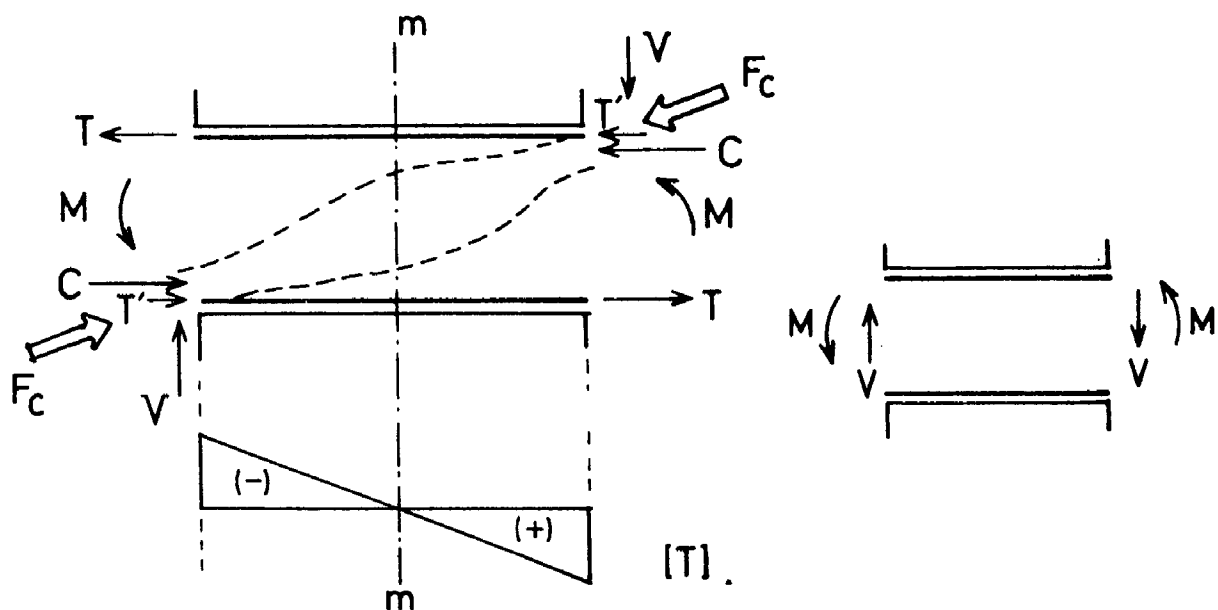
1.2.1 Πριν απ' την ρηγμάτωση.

Για μικρές στάθμες φορτίου, πριν απ' τον σχηματισμό σημαντικών διαγώνιων ρωγμών, η τέμνουσα δύναμη V και η θλιπτική δύναμη C λόγω κάμψεως μεταφέρονται στο σώμα της δοκού μέσω ενός διαγώνιου θλιπτήρα (βλ. Σχ. 1.2). Σαφής ενεργοποίηση του διαγώνιου θλιπτήρα γίνεται για λόγους διατμήσεως: $\alpha_s \leq 0.75$ [4]. Ο τρόπος αυτός μεταφοράς δυνάμεων επιβεβαιώνεται κι απ' την μορφολογία ρηγματώσεως των δοκιμών (βλ. Σχ. 4.1-4.5).

Η μεταφορά της τέμνουσας στην ακραία διατομή - σε κλασικά οπλισμένες δοκούς - απ' την στήριξη έως τον πρώτο συνδετήρα γίνεται μέσω της θλιβόμενης περιοχής του σκυροδέματος καθώς και μέσω των δράσεων βλήτρου των διαμήκων οπλισμών όταν ανοίξουν ρωγμές και συμβούν διατμητικές ολισθήσεις εγκαρσίως στον διαμήκη οπλισμό. Έτσι, ως μόνη συνήθης οδός μεταφοράς της τέμνουσας στην ακραία διατομή παραμένει η τριβή (εμπλοκή αδρανών) στη θλιβόμενη ζώνη, η οποία σημειωτέον έχει προ-ρηγματωθεί εφελκυστικώς (λόγω του ανακυκλιζόμενου χαρακτήρα της εντάσεως).

Πριν απ' τη διαγώνια ρηγμάτωση της δοκού, η κατανομή των δυνάμεων κατά μήκος των διαμήκων οπλισμών είναι όπως εκείνη που προβλέπει η κλασική θεωρία, λαμβανομένων υπόψη των επιβαλλόμενων M, V (βλ. Σχ. 1.2). Άλλωστε, η κατανομή αυτή έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικώς για επιβαλλόμενα φορτία τέτοια που να προκαλούν τάσεις στους διαμήκεις οπλισμούς μικρότερες ή ίσες περίπου με το $1/3$ της τάσεως διαρροής-τους.

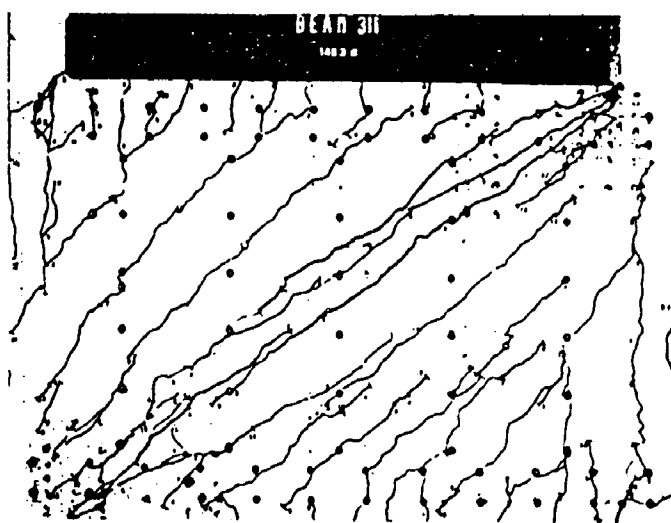
Για μεγαλύτερα όμως φορτία, ανοίγουν διαγώνιες ρωγμές και η κατανομή των δυνάμεων κατά μήκος των διαμήκων οπλισμών μεταβάλλεται (βλ. §1.2.2).



Σχ. 1.2: Μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων σε δοκό συζεύξεως πριν απ' την εμφάνιση διαγωνίων ρωγμών.

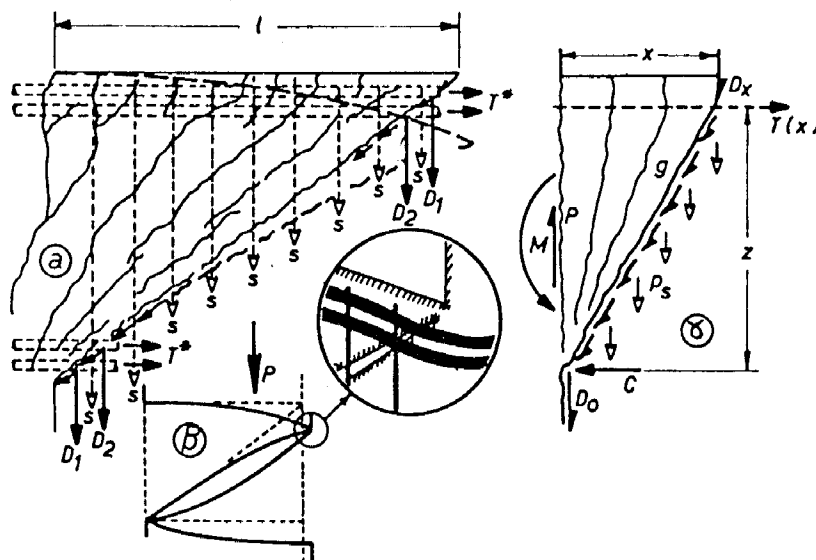
1.2.2 Μετά την διαγώνια ρηγμάτωση.

Μετά τον σχηματισμό διαγώνιων ρωγμών στο δοκίμιο (βλ. Σχ. 1.3), ενεργοποιούνται οι δυνάμεις βλήτρου των διαμήκων οπλισμών, καθώς και οι δυνάμεις εμπλοκής αδρανών κατά μήκος αυτών των ρωγμών.



Σχ. 1.3: Τυπική μορφολογία ρηγμάτωσης δοκού συζεύξεως με λόγο διατμήσεως $\alpha_s \leq 0.75$ που έχει υποβληθεί σε μονοτονική φόρτιση [1].

Και τότε, η κατανομή των δυνάμεων κατά μήκος των διαμήκων οπλισμών παύει να είναι η προβλεπόμενη απ' την κλασική ανάλυση (Σχ. 1.2). Η νέα κατανομή μπορεί να υπολογιστεί απ' την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται κατά μήκος μιάς διαγώνιας ρωγμής.



Σχ. 1.4: Μηχανισμός διαγώνιας εφελκυστικής αστοχίας και εσωτερικές δυνάμεις [1].

Ανάμεσα απ' τις διάφορες θυσσανοειδείς διαγώνιες ρωγμές θεωρούμε μία η οποία εκτείνεται έως κάποια απόσταση x απ' την ακραία διατομή της δοκού. Αν " η " είναι το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες κατά μήκος της ρωγμής αυτής, και αν θεωρήσουμε γραμμική μεταβολή των δυνάμεων βλήτρου D κατά μήκος των οπλισμών τότε, αμελώντας τις δυνάμεις λόγω εμπλοκής αδρανών, προκύπτει ότι η δύναμη T των διαμήκων οπλισμών μεταβάλλεται κατά μήκος του στοιχείου ως εξής [1]:

$$T(x) = \frac{Vl}{2z} [1 - (0.10 + \eta) \left(\frac{x}{l}\right)^2] = T_{\max} [1 - (0.10 + \eta) \left(\frac{x}{l}\right)^2] \quad (II)$$

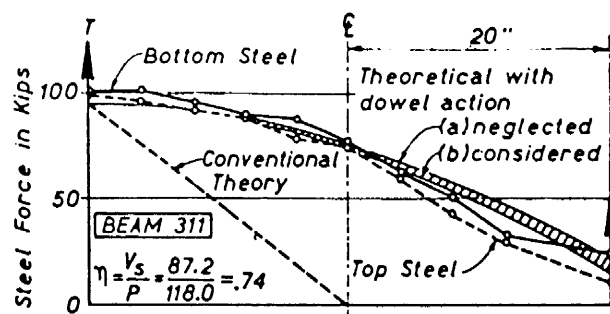
Ο παράγοντας 0.10 στην (II) εκφράζει προσεγγιστικά τη συνεισφορά του μηχανισμού βλήτρου στην ανάληψη της V .

Στο Σχ. 1.5α φαίνεται η κατανομή της T κατά μήκος του διαμήκους οπλισμού της δοκού του Σχ. 1.3 (με $\alpha_s = 0.65$), η οποία υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση. Η κατανομή της T που προέκυψε

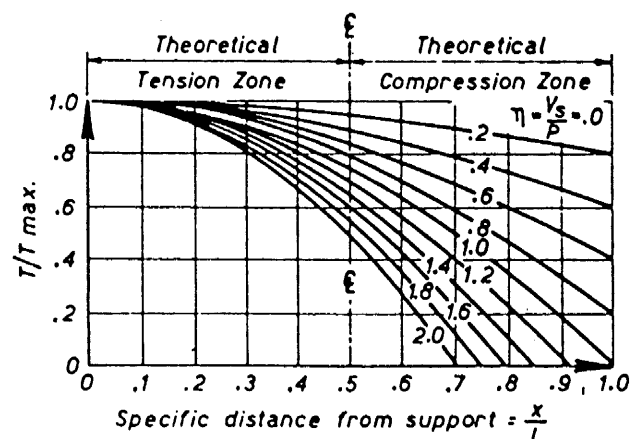
απ' το πείραμα συμπίπτει σχεδόν με εκείνη που υπολογίζεται απ' την εξίσωση (II) (συμβολίζεται με συνεχή γραμμή στο Σχ. 1.5α).

Η κατανομή της T που ισχύει στις κλασικές δοκούς σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 1.5α, διαφέρει δε πολύ απ' την πραγματική. Αποδεικνύεται έτσι ότι, στην πραγματικότητα, οι διαμήκεις οπλισμοί των δοκών συζεύξεως εφελκύνονται σε όλο το μήκος - ή στο μεγαλύτερο τμήμα-τους -, πράγμα που δεν μπορεί να προβλέψει η κλασική θεωρία.

Η μεταβολή της κατανομής της T που δίνεται απ' την εξίσωση (II) αν αμεληθεί η δράση βλήτρου υποδηλώνεται απ' το διαγραμμαμένο τμήμα του Σχ. 1.5α. Όπως φαίνεται, η συμβολή των δυνάμεων βλήτρου επηρεάζει ελάχιστα την $T(x)$. Επομένως, κατά τη χρήση της εξ. (II), για απλούστευση, ο παράγοντας 0.10 που εκφράζει τις δράσεις βλήτρου, μπορεί ενδεχομένως να παραλείπεται.



- α -



- β -

Σχ. 1.5α: Θεωρητική και πειραματική κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του οπλισμού κάμψεως.

β: Θεωρητική κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του οπλισμού κάμψεως για διάφορες τιμές του η .

Στο Σχ. 1.5β παριστάνονται καμπύλες μεταβολής της $T(x)$ για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\eta = V_s/P$, όπου η το ποσοστό της τέμνουσας που παραλαμβάνεται απ' τους συνδετήρες. Οι καμπύλες αυτές προέκυψαν απ' την εξ.(II) αμελώντας τη συνεισφορά των δράσεων βλήτρου.

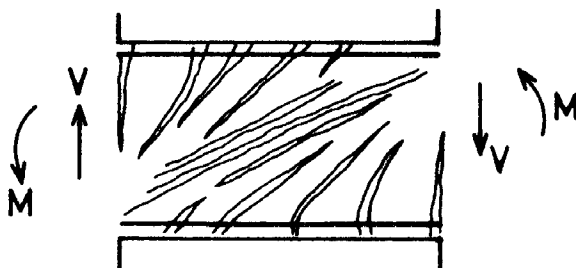
1.2.3 Μετά την γενίκευση της ρηγματώσεως

Οι θλιβόμενες ζώνες των ακραίων διατομών της δοκού αποδιοργανώνονται σχετικώς γρήγορα λόγω της σύνθετης εναλασσόμενης καταπονήσεως στην οποία υπόκεινται: θλίψη παρουσία μεγάλης τέμνουσας και διαδοχικώς, εφελκυσμός. Επί πλέον, μετά την εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών, οι διαμήκεις οπλισμοί παύουν να συνεισφέρουν στην ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων, διότι εφελκύνονται καθόλο το μήκος τους, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση της θλιβόμενης περιοχής του σκυροδέματος.

Η αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης εντείνεται εξ άλλου απ' την ασυμβατότητα παραμορφώσεων των δύο τριγωνικών τμημάτων της δοκού (βλ. λεπτομέρεια γωνίας, Σχ. 1.4β).

Εξαιτίας της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη των ακραίων διατομών, λόγω των ρωγμών ολισθήσεων (πρβλ. § 1.3.2), αλλά και λόγω της επεκτάσεως των υπολοίπων ρωγμών (βλ. Σχ. 1.6) μετά από ανακυκλίσεις σε μεγάλες στάθμες μετακινήσεων, παύει να λειτουργεί ο μηχανισμός του διαγώνιου θλιπτήρα.

Η τέμνουσα μεταφέρεται, κυρίως, με τον μηχανισμό δικτυώματος, μέσω των συνδετήρων και της εμπλοκής αδρανών κατά μήκος των ρωγμών, αλλ'ο μηχανισμός αυτός είναι πολύ εύκαμπτος.



Σχ. 1.6: Εικόνα γενικευμένης ρηγματώσεως δοκού συζεύξεως.

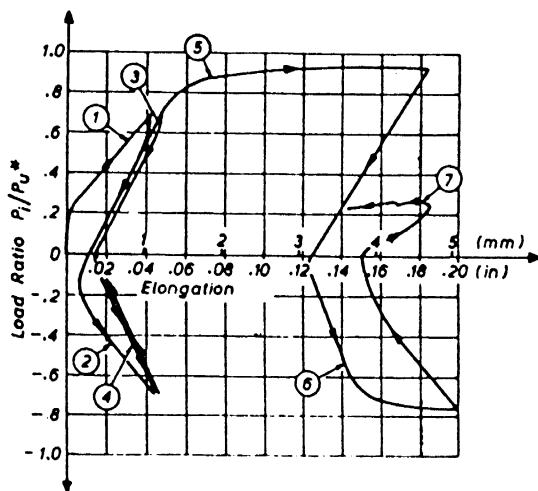
1.3 ΚΥΡΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

1.3.1 Διαγώνια εφελκυστική αστοχία

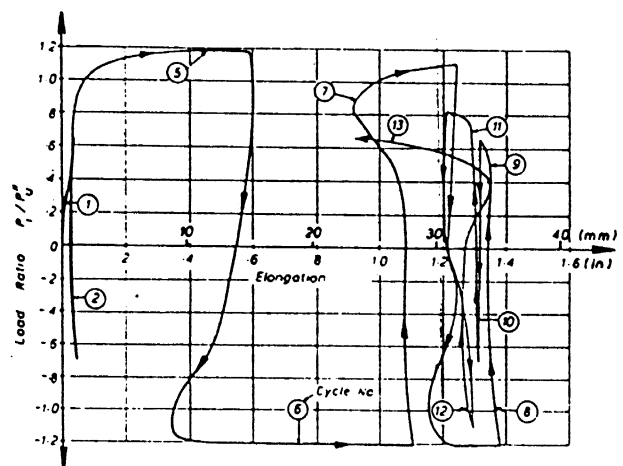
Δοκοί που είναι ανεπαρκώς οπλισμένες έναντι τέμνουσας, αστοχούν κατά μήκος διαγώνιων εφελκυστικών ρωγμών (diagonal tension failure). Όταν ο λόγος διατμήσεως " α_s " είναι μικρότερος του 0.75 [2], οι κρίσιμες διαγώνιες ρωγμές συμπίπτουν με τις κύριες διαγωνίους της δοκού (βλ. Σχ. 1.3). Για να αποφευχθεί η διαγώνια αστοχία θα πρέπει η τέμνουσα να παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου απ'τον οπλισμό διατμήσεως.

Σ' αυτόν τον τύπο αστοχίας η δοκός έχει την διάθεση να παραμορφωθεί όπως φαίνεται στο Σχ. 1.4β: Διαιρείται σε δύο τριγωνικά τμήματα, εκατέρωθεν της κρίσιμης κυρλής διαγωνίου, παρατηρούμε δε ότι όλη η δοκός επιμηκύνεται. Η επιμήκυνση αυτή επιβεβαιώνεται και πειραματικά, οφείλεται δε στην διαπιστωθείσα καθολική εφελκυστική ένταση κατά μήκος των διαμήκων ράβδων (πρβλ. §1.2.2).

Στο Σχ. 1.7 φαίνονται επιμηκύνσεις δοκών συζεύξεως που μετρήθηκαν πειραματικά [4]. Παρατηρείται ότι οι επιμηκύνσεις της κλασικώς οπλισμένης δοκού (Σχ. 1.7α) είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες της διαγωνίως οπλισμένης δοκού



- α -



- β -

Σχ. 1.7: Επιμήκυνση δοκών συζεύξεως [4]

α. με κλασική όπλιση

β. με δισδιαγώνιο οπλισμό.

(Σχ. 1.7β). Στην περίπτωση της διαγωνίως οπλισμένης δοκού η επιμήκυνση σταματάει μετά την έναρξη λυγισμού των διαγωνίων ράβδων (για ημικύκλους $n > 10$ στο Σχ. 1.7β, πρβλ. §1.3.3).

Με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου και των μετακινήσεων, μεγαλώνει το εύρος της κρίσιμης διαγώνιας ρωγμής, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνεισφορά του σκυροδέματος στην ανάληψη της τέμνουσας (λόγω μειωμένης δράσεως της εμπλοκής αδρανών).

Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της φέρουσας ικανότητας της δοκού κατά μήκος των διαγωνίων και οδηγεί, τελικώς, σε διαγώνια εφελκυστική αστοχία.

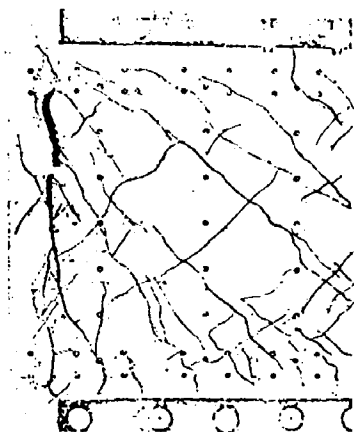
1.3.2 Αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως

Ο τύπος αυτός αστοχίας εμφανίζεται στις ακραίες διατομές όταν η δοκός είναι μεν επαρκώς οπλισμένη έναντι διατμήσεως (οπότε έχει αποτραπεί ο κίνδυνος διαγώνιας εφελκυστικής αστοχίας), συντρέχουν δε συνθήκες που σχολιάζονται περαιτέρω.

Για μεγάλες τιμές επιβαλλόμενου φορτίου και μετακινήσεως, αποδιοργανώνεται η θλιβόμενη περιοχή των ακραίων διατομών της δοκού, λόγω της ανακυκλιζόμενης εκτάσεως και του εφελκυσμού των διαμήκων οπλισμών σε όλο το μήκος τους (πρβλ. § 1.2.3).

Μετά τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού από εφελκυσμό, εμφανίζονται παραμένουσες παραμορφώσεις στον χάλυβα, οι οποίες εμποδίζουν το κλείσιμο των υπαρχουσών ρωγμών κατά την αντιστροφή του φορτίου. Έτσι, με την επιβολή τέμνουσας αντίθετης φοράς δεν υπάρχει επαφή μεταξύ των αδρανών στην ακραία διατομή και επομένως απαιτούνται σημαντικές διατμητικές ολισθήσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ώστε να έρθουν σε επαφή οι παρειές της ρωγμής και να αναλάβουν τέμνουσα. Με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου, το εύρος των ρωγμών αυξάνεται λόγω της επιμήκυνσεως της δοκού (βλ. Σχ. 1.7) με αποτέλεσμα να απαιτούνται ακόμα μεγαλύτερες ολισθήσεις στην ακραία διατομή για την ανάληψη τέμνουσας. Τελικώς, η ακραία διατομή ολισθαίνει ολόκληρη (shear sliding failure) - βλ. Σχ. 1.8 -

Οι δυνάμεις βλήτρου του διαμήκους οπλισμού στην ακραία διατομή ενεργοποιούνται μετά την εμφάνιση διατμητικών ολισθήσεων. Η συνεισφορά-τους όμως στην ανάληψη της τέμνουσας δεν είναι μεγάλη και δεν μπορούν να αποτρέψουν την διατμητική ολίσθηση.



Σχ. 1.8: Αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως και διαγώνιας θλίψεως [3].

Όπως φαίνεται απ' την περιγραφή του τρόπου αυτού αστοχίας, η αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως στην ακραία διατομή δεν μπορεί να αποτραπεί με αύξηση του ποσοστού συνδετήρων στην δοκό.

Ο Paulay [3] για την αποφυγή της αστοχίας λόγω ολισθήσεως προτείνει την πύκνωση των συνδετήρων στα άκρα της δοκού. Δοκός στην οποία εφαρμόστηκε αυτό εμφάνισε αύξηση της πλαστιμότητας και αστόχησε τελικώς στη θλιβόμενη περιοχή της ακραίας διατομής λόγω διαγώνιας θλίψης μεγάλης κλίσης.

Κινέζοι ερευνητές [7] καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι όταν απαιτούνται μεγάλα ποσοστά οπλισμού διατμήσεως δεν μπορεί να αποτραπεί η αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως. Πράγματι, στην περίπτωση αυτή η αντοχή σε τέμνουσα εξαρτάται απ' την φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος, επομένως απ' την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και απ' τις διαστάσεις της διατομής. Αρα, για να αποφευχθεί η αστοχία λόγω διατμητικής ολισθήσεως θα πρέπει οι διαστάσεις της διατομής να ικανοποιούν την σχέση [7]:

$$k.V \leq 0.15 f_{cb} \cdot b \cdot d_{ef} \quad (III)$$

όπου: K : συντελεστής ασφάλειας για στοιχεία που καταπονούνται σε διάτμηση και ο οποίος στην Κίνα λαμβάνεται ίσος με $k = 1,55$.

f_{cb} : πρισματική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

b, d_{ef} : πλάτος και ενεργό ύψος της διατομής, αντιστοίχως.

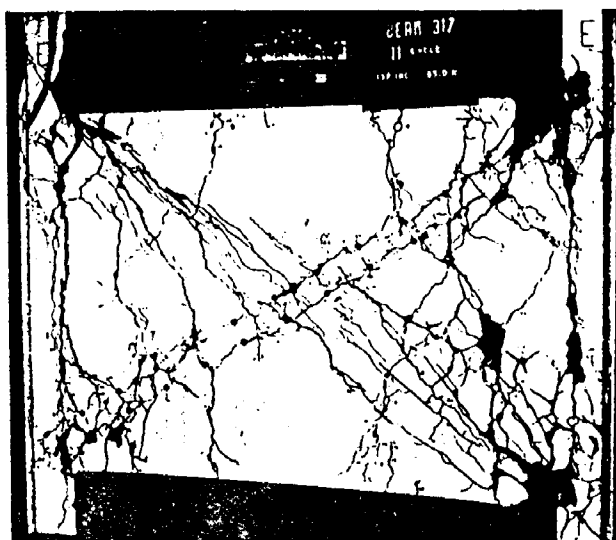
1.3.3 Αστοχία λόγω λυγισμού των διαγωνίων οπλισμών.

Η όπλιση δοκών συζεύξεως με δισδιαγώνιους οπλισμούς εμφανίζει μια ιδιαιτερότητα έναντι του κλασικού τρόπου οπλίσεως: το κύριο μέρος των εξωτερικών δυνάμεων μεταφέρεται μέσω του χάλυβα παρά μέσω του σκυροδέματος. Η συμπεριφορά των δοκών αυτών κυβερνάται απ' τα διαγώνια στοιχεία οπλισμού που θα πρέπει να είναι εξίσου αποτελεσματικά σε θλίψη και σε εφελκυσμό.

Πριν απ' τον σχηματισμό διαγωνίων ρωγμών μεγάλου εύρους, η θλιπτική δύναμη κατά μήκος του διαγώνιου θλιπτήρα αναλαμβάνεται απ' το σκυρόδεμα και απ' τον χάλυβα [4]. Μετά την επέκταση όμως των ρωγμών, και μετά την εφελκυστική διαρροή των διαγωνίων ράβδων, οι παραμένουσες παραμορφώσεις των οπλισμών εμποδίζουν το κλείσιμο των διαγωνίων ρωγμών κατά την αντιστροφή της φορτίσεως. Έτσι, κατά την θλίψη της διαγωνίου, το σκυρόδεμα δεν συμμετέχει στην ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων οι οποίες μεταφέρονται αποκλειστικά μέσω των διαγωνίων οπλισμών. Το σκυρόδεμα αρχίζει να μεταφέρει πάλι θλιπτικές δυνάμεις μόνον μετά την διαρροή σε θλίψη των διαγωνίων οπλισμών (οπότε βεβαίως συμβαίνουν ανεξέλεγκτες θλιπτικές παραμορφώσεις στον χάλυβα).

Μετά την εκδήλωση λυγισμού των διαγωνίων οπλισμών, η δοκός δεν μπορεί να αναλάβει μεγαλύτερο φορτίο. Εξακολουθεί όμως να αναλαμβάνει φορτίο διότι, κατά την αντιστροφή της φορτίσεως, οι ράβδοι που είχαν υποστεί λυγισμό ευθυγραμμίζονται κάπως λόγω του εφελκυσμού.

Όμως, ο λυγισμός (και, διαδοχικώς, το λίσωμα των ράβδων) καταστρέφει το σκυρόδεμα στις γωνίες της δοκού (βλ. Σχ. 1.9). Με την πρόοδο των ανακυκλίσεων παρέχεται όλο και λιγότερη πλευρική συγκράτηση των διαγωνίων ράβδων απ' το σκυρόδεμα, έως ότου επέλθει αστοχία της δοκού.



Σχ. 1.9: Αστοχία δοκού συζεύξεως με δισδιαγώνιους οπλισμούς [4].

Για να εξασφαλιστεί η καλή συμπεριφορά των δοκών με δισδιαγώνιους οπλισμούς είναι απαραίτητη η καλή αγκύρωση των διαγώνιων ράβδων στα γειτονικά τοιχώματα, καθώς και η επιβράδυνση εκδηλώσεως του λυγισμού-τους (μέσω πυκνών συνδετήρων).

1.4 ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ BERNOULLI-NAVIER ΝΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ ($\alpha_s < 1.00$)

Όπως περιγράφηκε και στα προηγούμενα, η ιδιαιτερότητα στη συμπεριφορά των δοκών συζεύξεως για μικρούς λόγους διατμήσεως ($\alpha_s \leq 1.00$) οφείλεται στο ότι δεν ισχύει η επιπεδότητα των διατομών. Αυτό συμβαίνει σε όλα τα στοιχεία με μικρό λόγο διατμήσεως στα οποία κυριαρχεί η τέμνουσα (λ.χ. κοντά υποστυλώματα).

Αποδείχθηκε ήδη ότι στις δοκούς συζεύξεως, μετά την διαγώνια ρηγμάτωση οι διαμήκεις οπλισμοί υπόκεινται σε εφελκυσμό σε όλο το μήκος-τους (πρβλ. §1.2.2). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη γρήγορη αποδιοργάνωση των θλιβόμενων περιοχών των ακραίων διατομών (πρβλ. §1.2.3), έχει ως συνέπεια ο μοχλοβραχίονας των συνιστωσών των εσωτερικών δυνάμεων να είναι μικρότερος απ'τον αντίστοιχο μιάς κλασικής δοκού με τα ίδια χαρακτηριστικά

διατομής. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο με την ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Από μετρήσεις βρέθηκε [3] ότι μετά την επέκταση των διαγωνίων ρωγμών, και κοντά στο φορτίο αστοχίας, ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων μπορεί να είναι έως και 60% του ενεργού ύψους διατομής: d_{ef} .

Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι, γενικώς, οι κλασικώς οπλισμένες δοκοί δεν φτάνουν την θεωρητική ροπή υπολογισμού-τους διότι προηγουμένως αστοχούν λόγω υπερβολικής παραμορφώσεως ή λόγω θραύσεως του σκυροδέματος [2], [5].

Πειράματα έχουν δείξει [2] ότι, μετά από ανακυκλίσεις σε μεγάλες στάθμες φορτίου, η καμπτική αντοχή που επιτυγχάνεται είναι μόνον γύρω στα 85% αυτής που προβλέπει η κλασική ανάλυση. Η μείωση αυτή της καμπτικής αντοχής αποδίδεται στη μείωση του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων.

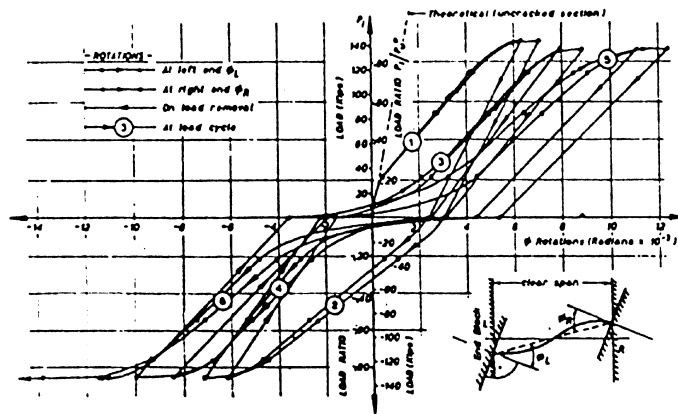
1.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ ΣΤΗΝ ΑΚΑΜΨΙΑ ΤΩΝ ΛΟΓΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ.

Σε κλασικά οπλισμένες δοκούς συζεύξεως, μετά τη διαγώνια ρηγματώση παρατηρείται σημαντική μείωση της ακαμψίας-τους.

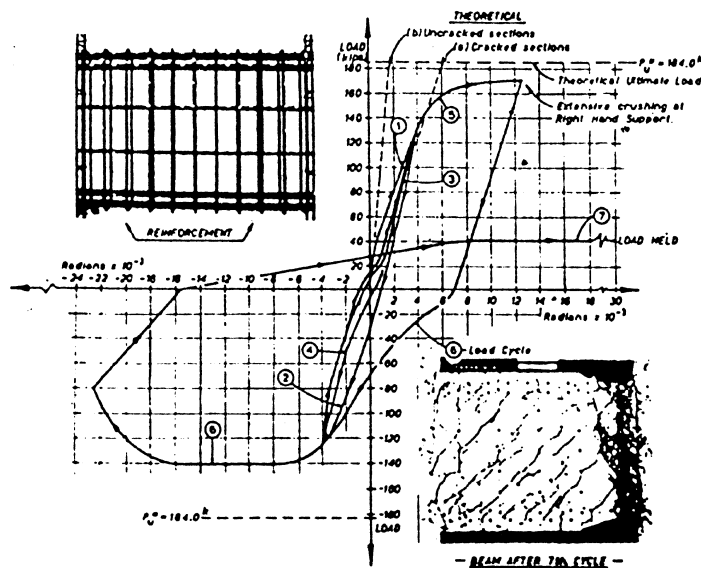
Μετά από αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων κλασικώς οπλισμένων δοκών συζεύξεως ο Paulay κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τελική ακαμψία ρηγματωμένης δοκού είναι περίπου ίση με το 20% της θεωρητικής ακαμψίας της αρηγματωτής δοκού [3], [2].

Στο Σχ. 1.10 φαίνονται οι καμπύλες επιβαλλόμενου φορτίου-στροφών κλασικώς οπλισμένων δοκών συζεύξεως με διαφορετικά ποσοστά διατμητικού οπλισμού. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η θεωρητική ελαστική ακαμψία $K_{ελ}$ των δοκών.

Στο Σχ. 1.11 παριστάνεται η μεταβολή της ακαμψίας της δοκού του Σχ. 1.10α συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, για τους διάφορους κύκλους φορτίσεως.



-α-



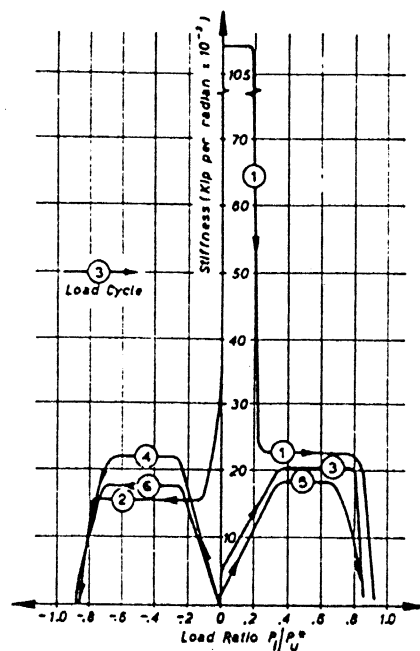
-β-

Σχ. 1.10: Διαγράμματα $V-1/\epsilon$ κλασικώς οπλισμένων δοκών συζεύξεως [2]

- α. με ανεπαρκές ποσοστό συνδετήρων
- β. με επαρκείς συνδετήρες.

Παρατηρείται ότι μετά τη διαγώνια ρηγμάτωση ($n = 1$), η ακαμψία μειώνεται περίπου κατά 80% της αρχικής-της τιμής. Στους επόμενους κύκλους φορτίσεως για μικρά επιβαλλόμενα φορτία η ακαμψία έχει σχεδόν μηδενική τιμή. Η ακαμψία της δοκού αυξάνει με την αύξηση του φορτίου, και φτάνει στη μέγιστη τιμή-της για $V_1/V_u \approx 0.30$.

Η σημασία αυτής της γρήγορης "ευκαμπτοποιήσεως" των δοκών συζεύξεως είναι μεγάλη διότι έτσι, μέσα στο υπερστατικό συζευγμένο τοίχωμα, θα παραλαμβάνουν πολύ μικρές ροπές και, επομένως, θα "ανακουφίζουν" πολύ λίγο τα συζευγνυόμενα τοιχώματα.



Σχ. 1.11: Μεταβολή της ακαμψίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (δοκός Σχ. 1.10α) [2]

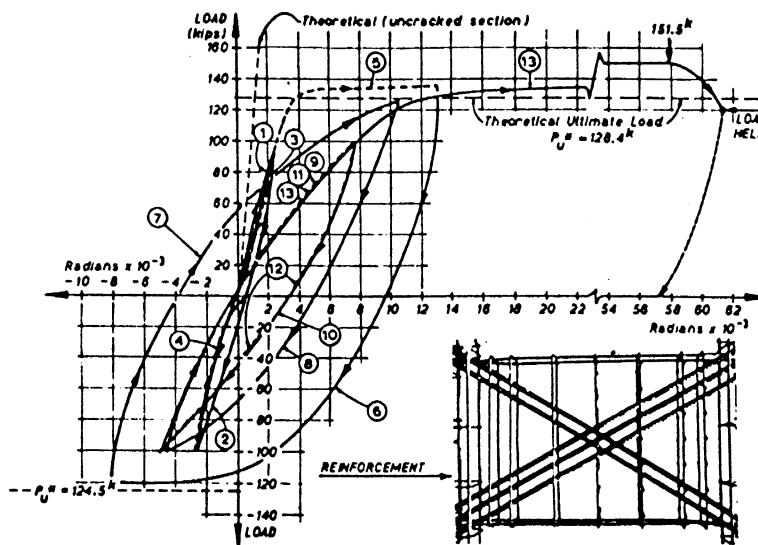
Η μειωμένη τιμή της ακαμψίας, που παρατηρείται για μικρές στάθμες επιβαλλόμενου φορτίου, εντείνεται με την πάροδο των ανακυκλίσεων. Οφείλεται στη διαρροή των συνδετήρων μετά το άνοιγμα μεγάλων ρωγμών. Κατά την αντιστροφή της φορτίσεως για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός του διαγώνιου θλιπτήρα θα πρέπει πρώτα να κλείσουν οι ρωγμές που έχουν ανοίξει στον προηγούμενο κύκλο. Για τον σκοπό αυτό απαιτούνται μικρά μόνον φορτία με, συγκριτικώς, μεγάλες στροφές. Μετά το κλείσιμο των ρωγμών αρχίζει να αυξάνεται πάλι η ακαμψία της δοκού (κράτυνση).

Η μείωση της ακαμψίας για μικρά φορτία παρατηρείται κι απ' τη στένωση που εμφανίζουν οι βρόχοι υστερήσεως στο μέσον τους. Η στένωση αυτή είναι πολύ εντονότερη στην περίπτωση της δοκού με ανεπαρκείς συνδετήρες (Σχ. 1.10α) απ' ό,τι στη δοκό με επαρκείς συνδετήρες (Σχ. 1.10β). Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι για μικρά ποσοστά οπλισμού διατμήσεως μετά την διαγώνια ρηγμάτωση όλοι οι συνδετήρες διαρρέουν, οπότε δεν μπορούν να συμβάλλουν πλέον στον περιορισμό του εύρους των ρωγμών.

Η μορφή του βρόχου υστερήσεως του Σχ. 1.10α ("στένωση" pinching) είναι χαρακτηριστική των στοιχείων που συμπεριφέρονται

διατμητικά και έχουν μικρή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Η συμπεριφορά των δοκών συζεύξεως που είναι οπλισμένες με δισδιαγώνιους οπλισμούς καθορίζεται κυρίως, απ' τους διαγώνιους οπλισμούς και όχι τόσο απ' το σκυρόδεμα (πρβλ. § 1.3.3). Έτσι η ακαμψία-τους είναι ανεξάρτητη της ρηγματώσεως του σκυροδέματος. Τα διαγράμματα φορτίου - μετακινήσεων των δοκών αυτών



Σχ. 1.12: Τυπικό διάγραμμα V-φ δοκού συζεύξεως με δισδιαγώνιο οπλισμό [2].

θυμίζουν αντίστοιχα διαγράμματα στοιχείων από χάλυβα [4], [6] και δεν εμφανίζουν στένωση στο μέσον του βρόχου (βλ. Σχ. 1.12). Απότομη μείωση της ακαμψίας των δοκών αυτών εμφανίζεται μετά τον λυγισμό των διαγωνίων ράβδων του οπλισμού.

Μια μεθοδολογία υπολογισμού της μειωμένης ακαμψίας των δοκών συζεύξεως λόγω ρηγματώσεως, σε περίπτωση μονοτονικής φορτίσεως, προτείνεται από τον Paulay [1]. Δέχεται ότι οι σημαντικότεροι εσωτερικοί μηχανισμοί που προκαλούν παραμορφώσεις σε ρηγματωμένη δοκό συζεύξεως, κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι οι παρακάτω:

- (1) Μεταφορά τέμνουσας μέσω του μηχανισμού δικτυώματος και αντίστοιχες διατμητικές παραμορφώσεις.
- (2) Θλίψη κατά μήκος της κυρλής διαγωνίου λόγω του μηχανισμού θλιπτήρα (τόξου).

- (3) Κάμψη και αντίστοιχες στροφές.
- (4) Δυνάμεις λόγω του οπλισμού κάμψεως και αντίστοιχη επιμήκυνση της δοκού.

1.6 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ

Απ' τις παρατηρήσεις των μέχρι σήμερα διεξαχθεισών ερευνών μπορούν να εξαχθούν ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν την πλαστιμότητα των δοκών συζεύξεως. Ποσοτικές συγκρίσεις, όμως, μεταξύ των δεικτών πλαστιμότητας που υπολογίζονται δεν μπορούν να γίνουν. Κι' αυτό, γιατί ο τρόπος υπολογισμού των δεικτών πλαστιμότητας μετακινήσεων ή στροφών, διαφέρει στις διάφορες πειραματικές εργασίες.

Για την επίτευξη μεγάλης πλαστιμότητας στις δοκούς συζεύξεως πρέπει, κατά το σχεδιασμό-τους, να επιδιώκεται κομποδιατητική και όχι διατημητική αστοχία. Η δοκός πρέπει να οπλίζεται, δηλαδή, ισχυρώς έναντι τέμνουσας και ασθενέστερα έναντι κάμψεως.

Η διαρροή των συνδετήρων θα πρέπει να αποφεύγεται και, οπωσδήποτε, να évεται της διαρροής του οπλισμού κάμψεως. Κι αυτό διότι οι συνδετήρες, προτού διαρρεύσουν, συμβάλλουν στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω περισφλγξεως, καθώς και στον περιορισμό του εύρους των ρωγμών. Η αύξηση, όμως, του οπλισμού διατημήσεωςέρα από ένα ορισμένο ποσοστό δεν βελτιώνει περαιτέρω τη συμπεριφορά της δοκού, αλλ' οδηγεί μάλλον σε σπατάλη οπλισμού.

Κατά τον σχεδιασμό των δοκών συζεύξεως θα πρέπει να αποφεύγεται η διαγώνια εφελκυστική αστοχία η οποία είναι ψαθυρή. Για να επιτευχθεί αυτό, η τέμνουσα αστοχίας θα πρέπει να μπορεί να παραληφθεί εξ ολοκλήρου απ' τον οπλισμό διατημήσεως [2], [5], (πρβλ. §1.3.1). Θα πρέπει να αγνοούνται, δηλαδή, η συνεισφορά του σκυροδέματος και η δράση βλήτρου στην ανάληψη της τέμνουσας.

Επίσης, θα πρέπει να επιδιώκεται η αποφυγή της αστοχίας λόγω διατημητικής ολισθήσεως των ακραίων διατομών (πρβλ. §1.3.2)

η οποία είναι κι αυτή ψαθυρής μορφής. Για την αποφυγή-της και για αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας προτείνεται αύξηση της περισφίξεως στις περιοχές των στηρίξεων της δοκού [3].

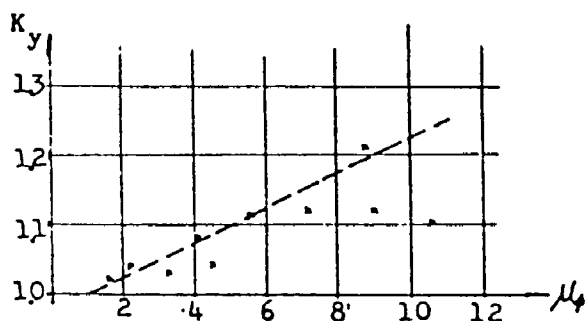
Ένας έμμεσος δείκτης εκτιμήσεως της διαθέσιμης πλαστιμότητας στροφών που εισάγεται στη βιβλιογραφία [5] είναι ο λόγος K_y :

$$K_y = \frac{\text{Φορτίο αστοχίας}}{\text{Φορτίο διαρροής}} \quad (\text{failure yield ratio})$$

Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο K_y , τόσο μεγαλύτερη δυνατότητα αναλήψεως φορτίου και μετακινήσεων έχει η δοκός απότου διαρρεύσουν οι καμπτικοί οπλισμοί. Η αύξηση του φορτίου που αναλαμβάνει το στοιχείο μετά τη διαρροή των οπλισμών οφείλεται στην κράτωση του χάλυβα (εάν την διαθέτει).

Για τιμές $K_y < 1,20$ θεωρείται πιθανή η διατμητική αστοχία της δοκού. Για πολύ μεγάλες τιμές του K_y γίνεται σπατάλη οπλισμού χωρίς ανάλογη βελτίωση της πλαστιμότητας της δοκού.

Από πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια από ελαφροσκυρόδεμα προέκυψε η συσχέτιση K_y - μ_ϕ που φαίνεται στο Σχ. 1.13.

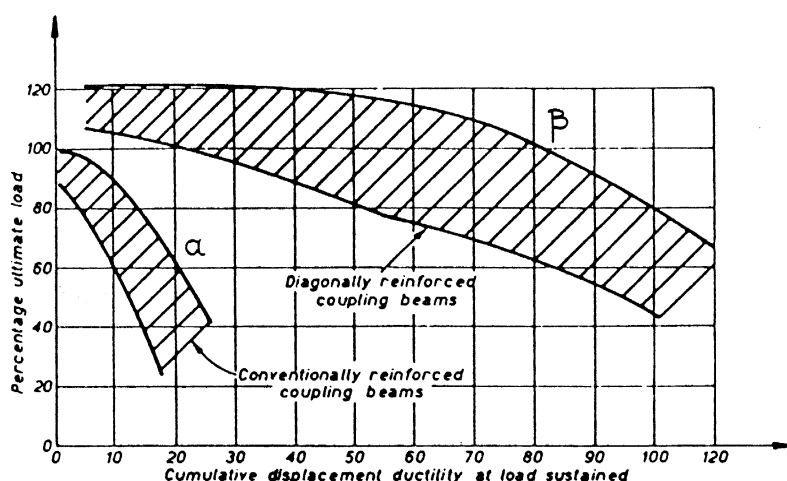


Σχ. 1.13: Μεταβολή του λόγου K_y του φορτίου αστοχίας προς το φορτίο διαρροής, συναρτήσεϊ του δείκτη πλαστιμότητας στροφών [5].

Γενικώς, ο κλασικός τρόπος οπλίσεως των δοκών συζεύξεως κρίνεται ότι παρέχει ανεπαρκή πλαστιμότητα, ιδίως για λόγους διατμήσεως $\alpha_s < 0.75$ [9], και γι'αυτό πρέπει να αποφεύγεται.

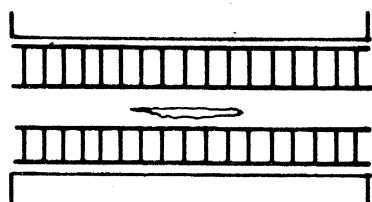
Η όπλιση με διαγώνιους οπλισμούς θεωρείται ως η πλέον αποτελεσματική για την αύξηση της πλαστιμότητας των δοκών συζεύξεως.

Στο Σχ. 1.14 φαίνεται η θεαματική αύξηση του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας διαγωνίως οπλισμένης δοκού συζεύξεως συγκριτικά με κλασικώς οπλισμένην (η έννοια του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας εξηγείται στην §7.2).



Σχ. 1.14: Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου για δοκούς συζεύξεως α) κλασικώς οπλισμένες και β) διαγωνίως οπλισμένες.

Τέλος, Κινέζοι ερευνητές [5], από πειράματα σε δοκίμια από ελαφροσκυρόδεμα παρατήρησαν ότι η τεχνητή μείωση του λόγου διατμήσεως δοκών συζεύξεως με την δημιουργία ρωγμής στο μέσον-τους (βλ. Σχ. 1.15) οδήγησε σε αύξηση της πλαστιμότητας.



Σχ. 1.15: Τεχνητή μείωση του λόγου διατμήσεως δοκού συζεύξεως με τη δημιουργία ρωγμής στο μέσον-της [5].

1.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΥΖΕΥΞΕΩΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Σ' αυτό εδώ το κεφάλαιο αναπτύσσεται εκτενέστερα η επίδραση των δοκών συζεύξεως στην συνολική συμπεριφορά του συστήματος των συζευγμένων τοιχωμάτων.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως (πρβλ. § 1.1), οι δοκοί συζεύξεως μεταφέρουν τέμνουσες δυνάμεις στα εκατέρωθεν τοιχώματα. Το άθροισμα των τεμνουσών δυνάμεων στο κάθε τοίχωμα δίνει μία αξονική δύναμη T , θλιπτική ή εφελκυστική, αναλόγως με την φορά της επιβαλλόμενης οριζόντιας δυνάμεως (βλ. Σχ. 1.1).

Ο πλήρης μηχανισμός διαρροής ενός συζευγμένου τοιχώματος θεωρείται ότι ενεργοποιείται μετά την εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών καθώς και στις βάσεις των τοιχωμάτων.

Για την εκμετάλλευση όλης της διαθέσιμης αντοχής του συστήματος των συζευγμένων τοιχωμάτων θα πρέπει οι δοκοί συζεύξεως να έχουν τη δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων χωρίς σημαντική απώλεια της αποκρίσεως-τους, ώστε να επιτρέπουν εντωμεταξύ την πλαστικοποίηση όλων των δοκών αλλά και των βάσεων-τους. Έτσι, ένας σωστός σχεδιασμός πρέπει να εξασφαλίζει μια σχεδόν ταυτόχρονη εξάντληση της αντοχής των δοκών και των τοιχωμάτων.

Για τον σκοπό αυτόν, βασική-μας απαίτηση είναι οι δοκοί συζεύξεως να έχουν μεγάλη ικανότητα καταναλώσεως ενέργειας, η δε αναλισκόμενη ενέργεια να εκτείνεται σε όλο το ύψος του συστήματος και να μην περιορίζεται μόνον κοντά στη βάση των τοιχωμάτων.

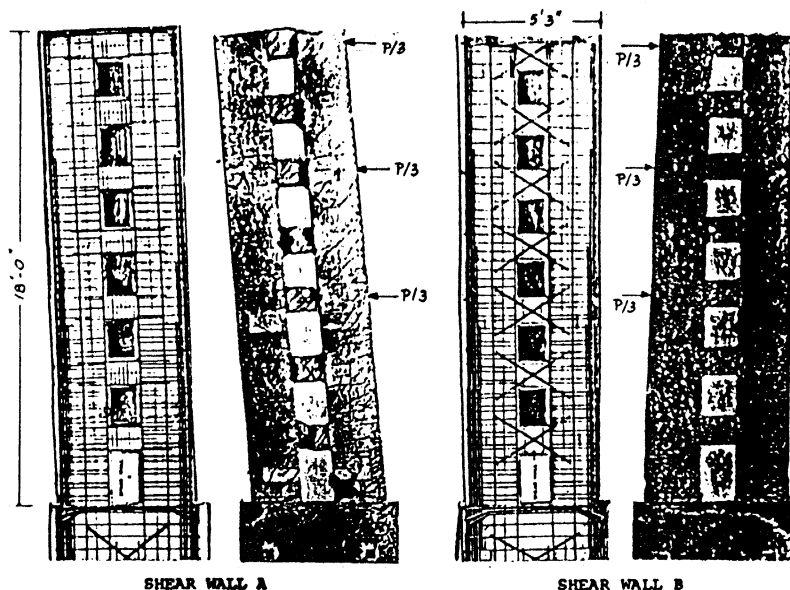
1.7.1 Τρόπος οπλίσεως των δοκών συζεύξεως

Η επίδραση του τρόπου οπλίσεως των δοκών συζεύξεως στη συμπεριφορά του συστήματος των συζευγμένων τοιχωμάτων διερευνήθηκε πειραματικώς από τους Paulay-Santhakumar [9], [10]. Δοκιμάστηκαν δύο 7όροφα συστήματα συζευγμένων τοιχωμάτων, σε κλίμακα 1:4. Στο ένα (Α) οι δοκοί συζεύξεως ήσαν κλασικώς οπλισμένες,

ενώ στο άλλο (B) είχαν οπλιστεί με δισδιαγώνιους οπλισμούς (βλ. Σχ. 1.16). Επεβλήθη ανακυκλιζόμενη φόρτιση στις στάθμες που φαίνονται στο Σχ. 1.16.

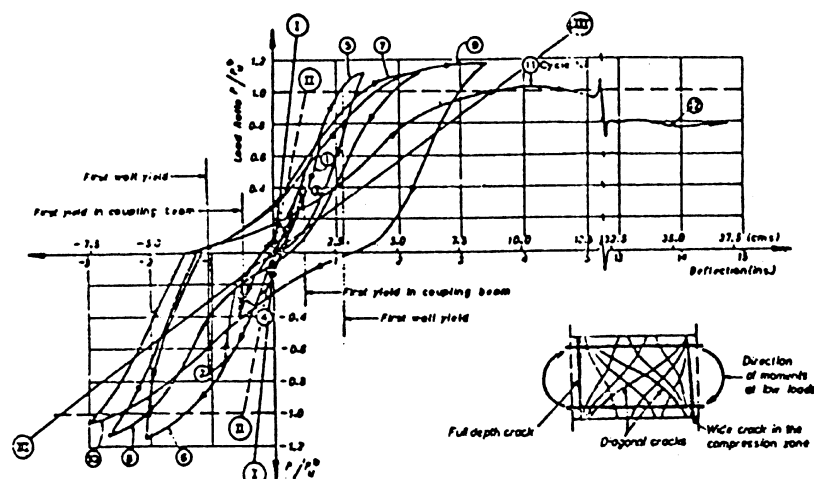
Το σύστημα Α αστόχησε στη θλιβόμενη περιοχή του εφελκυσμένου τοιχώματος ενώ, το σύστημα Β αστόχησε λόγω λυγισμού των οπλισμών στο θλιβόμενο τοίχωμα ο οποίος προκλήθηκε από κατασκευαστικές ατέλειες.

Οι κλασικώς οπλισμένες δοκοί του συστήματος Α αστόχησαν στα άκρα λόγω διατμητικής ολισθήσεως (βλ. Σχ. 1.16) (η διαγώνια αστοχία αποφεύχθηκε διότι οι συνδετήρες είχαν σχεδιαστεί ώστε να αναλαμβάνουν όλη την τέμνουσα). Οι δοκοί με δισδιαγώνιο οπλισμό (B), αν και ο οπλισμός-τους διέρρευσε σημαντικά, εμφάνισαν πολύ μικρότερη ρηγματώση και μικρότερες παραμορφώσεις απ' τις δοκούς με κλασική όπλιση.

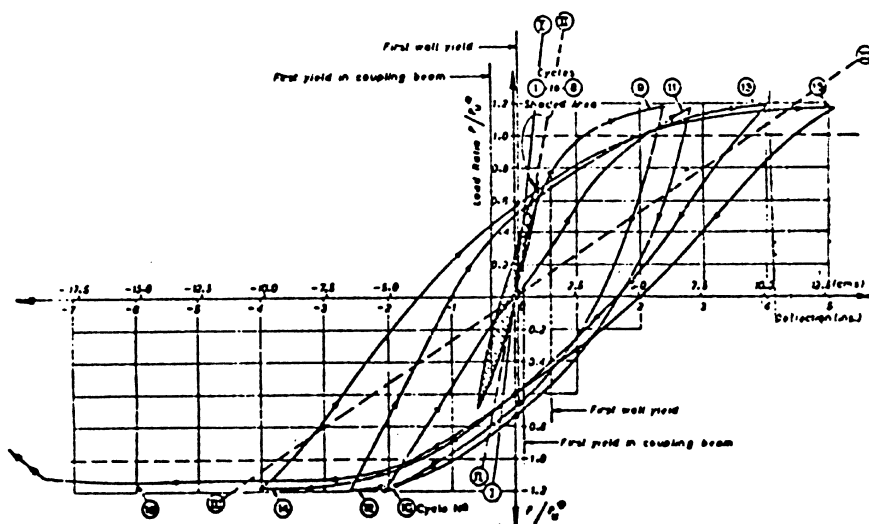


Σχ. 1.16: Τρόπος οπλίσεως και μορφολογία ρηγματώσεως τοιχωμάτων Α και Β [10].

Στο Σχ. 1.17 φαίνονται τα διαγράμματα φορτίου-μετακινήσεως κορυφής των δύο συστημάτων. Απ' την μορφή των βρόχων υστερήσεως είναι εμφανής η πιο πλάστιμη συμπεριφορά του συστήματος Β με τις δισδιαγώνιως οπλισμένες δοκούς.



-α-

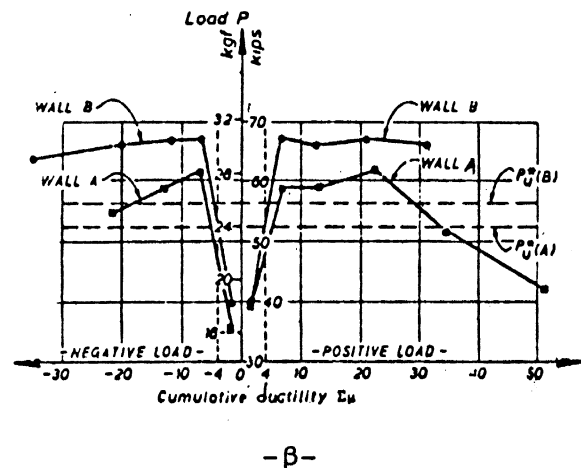
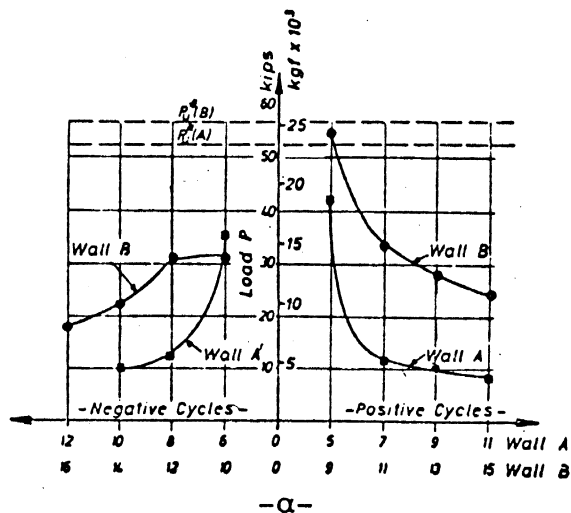


-β-

Σχ. 1.17: Διαγράμματα φορτίου-μετακινήσεως κορυφής συστημάτων συζευγμένων τοιχωμάτων.

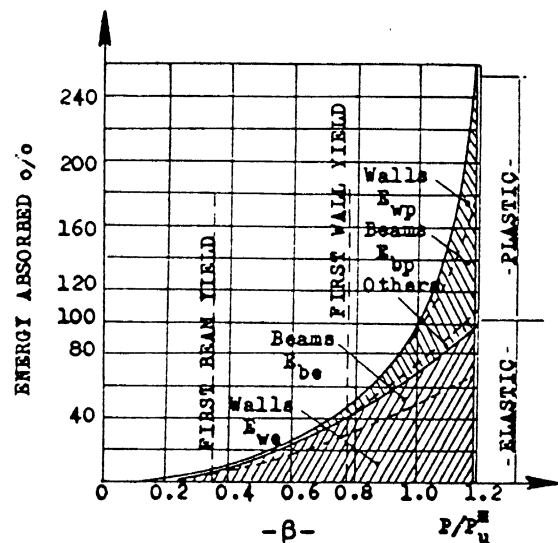
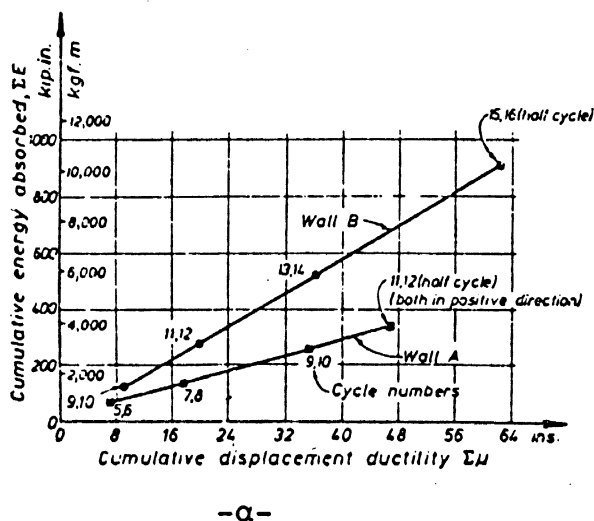
- α) κλασικώς οπλισμένες δοκοί συζεύξεως
- β) δοκοί συζεύξεως με δισδιαγώνιο οπλισμό

Επίσης, το σύστημα Β εμφάνισε μεγαλύτερη ικανότητα αναλήψεως φορτίου απ'ό,τι το σύστημα Α (βλ. Σχ. 1.18α), μικρότερη μείωση αποκρίσεως συναρτήσεως των μετακινήσεων (Σχ. 1.18β), καθώς και μεγαλύτερη ικανότητα απορροφήσεως ενέργειας (βλ. Σχ. 1.19α).



Σχ. 1.18α: Φορτίο που ανέλαβαν τα συστήματα Α,Β συναρτήσει του πλήθους των ημικύκλων φορτίσεως για μετακίνηση κορυφής ίση με τη διπλάσια θεωρητική μετακίνηση διαρροής.

β: Μεταβολή του φορτίου συναρτήσει της αθροιστικής πλαστιμότητας μετακινήσεων.



Σχ. 1.19α: Σύγκριση της απορροφούμενης ενέργειας των συστημάτων Α,Β, συναρτήσει της αθροιστικής πλαστιμότητας μετακινήσεων.

β: Ποσοστά αναλισκόμενης ενέργειας δοκών και τοιχωμάτων στο σύστημα Β, κατά τον κύκλο $n = 9$.

Στο Σχ. 1.19β φαίνονται τα ποσοστά απορροφούμενης ενέργειας του συστήματος Β: Με E_{be} , E_{we} συμβολίζεται η ελαστική ενέργεια και με E_{bp} , E_{wp} η πλαστική ενέργεια των δοκών και των τοιχωμάτων, αντιστοίχως. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για

τιμές φορτίου μέχρι 1.10 της θεωρητικής αντοχής του συστήματος, το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας καταναλωνόταν απ' τις δοκούς συζεύξεως - E_{bp} - και όχι απ' τα τοιχώματα - E_{wp} -.

Είναι εμφανής λοιπόν η συνεισφορά των δοκών συζεύξεως στην κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα.

Δεδομένου ότι τα δύο συστήματα Α και Β διέφεραν μόνον κατά τον τρόπο οπλίσεως των δοκών συζεύξεως, η καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος Β αποδίδεται στην βελτιωμένη συμπεριφορά των δισδιαγωνίως οπλισμένων δοκών συζεύξεως έναντι των κλασικώς οπλισμένων δοκών του Α.

1.7.2 Βαθμός συζεύξεως δοκών-τοιχωμάτων

Η επιρροή του βαθμού συζεύξεως των τοιχωμάτων μέσω των δοκών (ασθενής ή ισχυρή σύζευξη) εξετάστηκε πειραματικά [11] μέσω δορόφου συστήματος συζευγμένων τοιχωμάτων σε κλίμακα 1:3. Οι δοκοί συζεύξεως ήσαν κλασικώς οπλισμένες.

Ως βαθμός συζεύξεως θεωρήθηκε το ποσοστό της ροπής αντοχής στη βάση του συστήματος το οποίο οφείλεται στις αξονικές δυνάμεις T των τοιχωμάτων. (Οι δυνάμεις T αναπτύσσονται λόγω των δοκών συζεύξεως - πρβλ. §1.1 -).

Κατά την πρώτη δοκιμή οι δοκοί συζεύξεως ήσαν ασθενείς συγκριτικά με τα τοιχώματα (το "ποσοστό συζεύξεως" εκτιμήθηκε περίπου 11%). Οι δοκοί διέρρευσαν πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα να απαιτούντο μεγάλοι δείκτες πλαστιμότητας για την διαρροή του οπλισμού των τοιχωμάτων και την ενεργοποίηση του πλήρους μηχανισμού αστοχίας (δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών και στις βάσεις των τοιχωμάτων). Μετά την πάροδο μικρού αριθμού ανακυκλώσεων οι δοκοί συμπεριφέρονταν απλώς ως "αξονικοί σύνδεσμοι" των τοιχωμάτων χωρίς σημαντική ικανότητα μεταφοράς τεμνουσών δυνάμεων. Στην περίπτωση αυτή η συνολική αντοχή του συστήματος καθορίστηκε απ' την πλαστιμότητα των δοκών.

Η δοκιμή επαναλήφθηκε μετά απ' την επισκευή και την ενίσχυση των δοκών (ποσοστό επιτευχθείσας συζεύξεως περίπου 30%). Παρατηρήθηκε μείωση της πλαισιακής λειτουργίας του συστήματος, αύξηση της συνολικής ακαμψίας, καθώς και σημαντική αύξηση του

φορτίου διαρροής των δοκών. (Καί στις δύο περιπτώσεις η διαρροή των δοκών ξεκίνησε απ' τους υψηλότερους ορόφους, τελευταία δε διέρρευσε η δοκός της πρώτης στάθμης). Στην περίπτωση "ισχυρών" δοκών συζεύξεως, κρίσιμη για την αντοχή του συστήματος ήταν η πλαστιμότητα των τοιχωμάτων.

Παρατηρήθηκε ακόμη ότι στην περίπτωση ασθενών δοκών συζεύξεως η αξονική δύναμη T (βλ. Σχ. 1.1) που αναπτύχθηκε στα τοιχώματα, λόγω των τεμνουσών δυνάμεων των δοκών, δεν επηρέασε την συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Ενώ στις ισχυρές δοκούς, όπου μεταβιβάζονται μεγάλες τέμνουσες και η δύναμη T είναι μεγάλη, βρέθηκε ότι η αντοχή των τοιχωμάτων ήταν μειωμένη συγκριτικά με τοιχώματα όπου η αξονική δύναμη είναι μηδέν.

Ετσι, για την καλή συμπεριφορά ενός συστήματος συζευγμένων τοιχωμάτων επιδιώκεται η σύνδεση μέσω δοκών συζεύξεως να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να επιτυγχάνεται η συνεργασία των τοιχωμάτων (αποφυγή πλαισιακής λειτουργίας) όχι όμως και υπερβολικά ισχυρή γιατί τότε επιβαρύνονται πολύ τα τοιχώματα με δυσμενείς επιπτώσεις για την συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

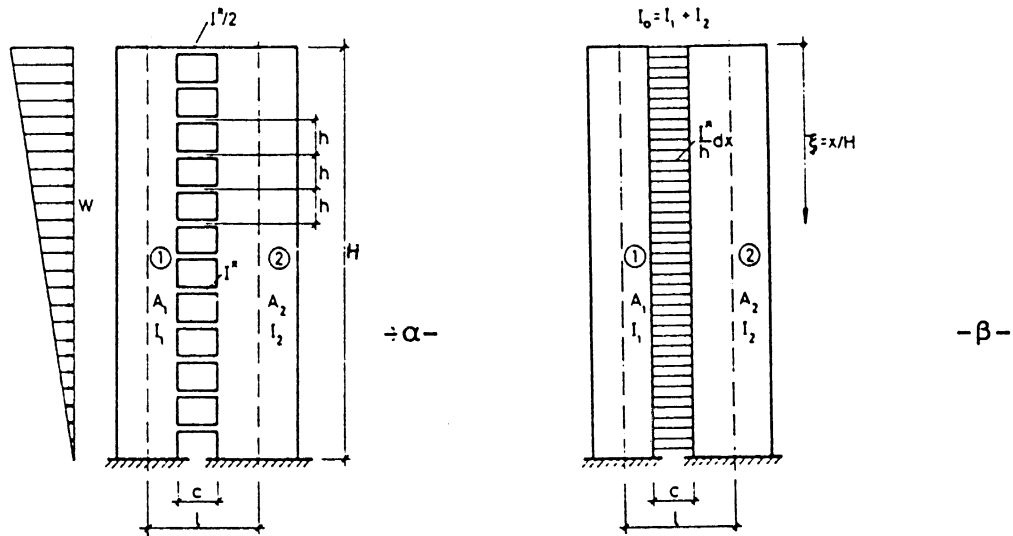
1.7.3 Εκτίμηση αλληλεπιδράσεως δοκών-τοιχωμάτων μέσω θεωρητικού προσομοιώματος.

Για την επίλυση των συζευγμένων τοιχωμάτων χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος "διανεμημένης ακαμψίας" (laminar method of analysis). Στη μέθοδο αυτή τα ανοίγματα καθύψος υποκαθίστανται από απειρωστές ελαστικές στρώσεις ισοδύναμης ακαμψίας (βλ. Σχ. 1.20β). Η αναλογία αυτή επιτρέπει την αντιμετώπιση του προβλήματος μέσω μίας διαφορικής εξισώσεως (1), απ' την επίλυση της οποίας προκύπτουν οι ζητούμενες εσωτερικές δυνάμεις, ροπές και μετακινήσεις ως συνεχής συνάρτηση της αποστάσεως απ' την αρχή του κατακόρυφου άξονα.

$$\frac{d^2 T}{d\xi^2} - \beta^2 T + \gamma H^2 M_0 = 0 \quad (1)$$

όπου T : η συνάρτηση της άγνωστης αξονικής που δρα στο τοίχωμα.
 M_0 : η ροπή του προβόλου που προέρχεται απ' τα εξωτερικά φορτία όλης της κατασκευής.

$$\xi = \frac{x}{H}, \quad \beta^2 = H^2 \left(\frac{1}{I_0} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \frac{12I^*}{hc^3}, \quad \gamma = \frac{12I^*}{hc^3 I_0}$$



Σχ. 1.20 α: Χαρακτηριστικά συζευγμένου τοιχώματος.

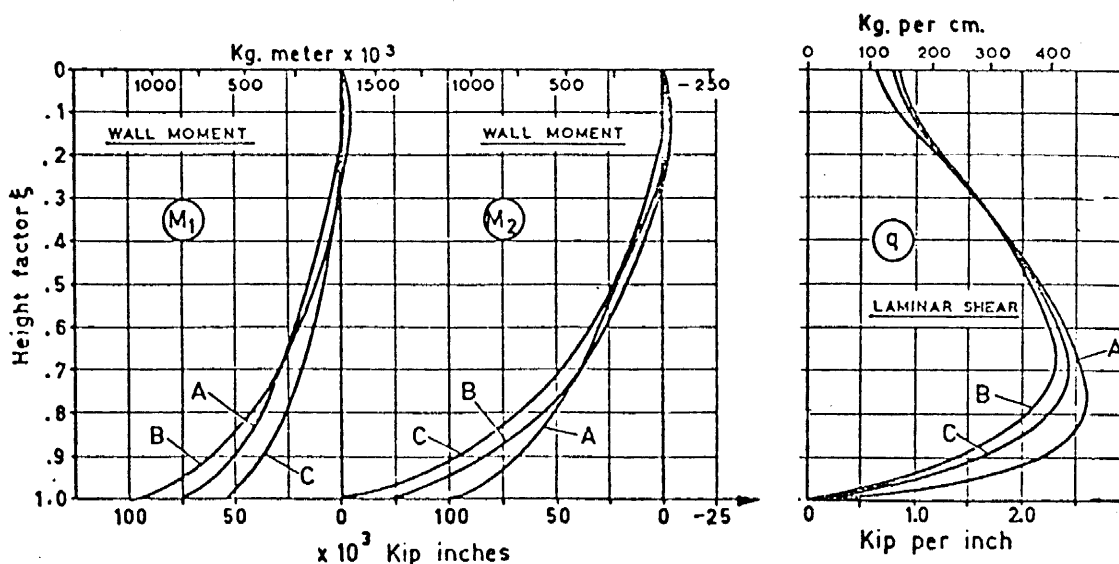
β: Προσωμολωμα του συζευγμένου τοιχώματος με διανεμημένη ακαμψία.

Η ανάλυση αυτή προϋποθέτει ελαστικές συνθήκες και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό πολυωρόφων κατασκευών στις οποίες οι μόνες πλευρικές δυνάμεις που μπορεί να ασκηθούν οφείλονται σε ανεμφοπιέσεις.

Σε περίπτωση όμως σεισμού, η ρηγμάτωση των δοκών και των τοιχωμάτων οδηγεί σε μείωση της ακαμψίας τους. Στο Σχ. 1.21 φαίνονται οι μεταβολές της κατανομής των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν αν στην εξ.(1) χρησιμοποιηθούν μειωμένες τιμές της ροπής αδράνειας των στοιχείων.

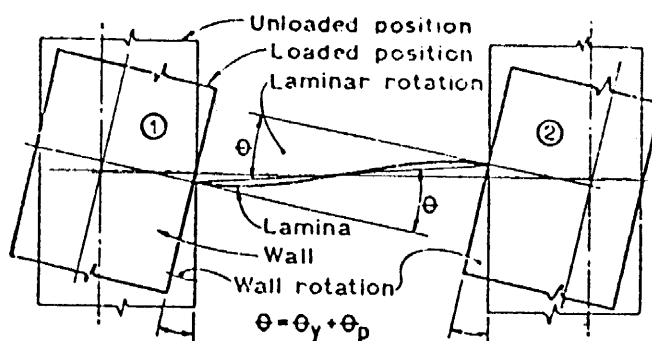
Για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων συστήματος συζευγμένων τοιχωμάτων που υπόκειται σε μεγάλες τιμές πλευρικού φορτίου η εξίσωση 1 λύνεται προσεγγιστικά με διάφορες μεθόδους. Μιά απ' τις πιο γνωστές είναι του Paulay [7] ο οποίος επιλύει την (1) βήμα προς βήμα θεωρώντας, διαδοχικά τα παρακάτω στάδια φορτίσεως της κατασκευής.

- 1.- Ελαστική συμπεριφορά.
- 2.- Διαρροή της πλέον κρίσιμης δοκού.



Σχ. 1.21: Μεταβολή της τέμνουσας q των δοκών και των ροπών M_1 , M_2 των τοιχωμάτων, καθύψος του συστήματος [7].
 A: αρηγμάτωτες διατομές
 B: ρηγμάτωση των δοκών συζεύξεως
 C: ρηγμάτωση των δοκών συζεύξεως και του τοιχώματος 1.

- 3.- Διαρροή όλων των δοκών συζεύξεως. Τα τοιχώματα εξακολουθούν να συμπεριφέρονται ελαστικά.
- 4.- Εξάντληση της αντοχής του τοιχώματος 1 που βρίσκεται υπό εφελκυσμό.
- 5.- Εξάντληση της αντοχής του τοιχώματος 2 που βρίσκεται υπό θλίψη.



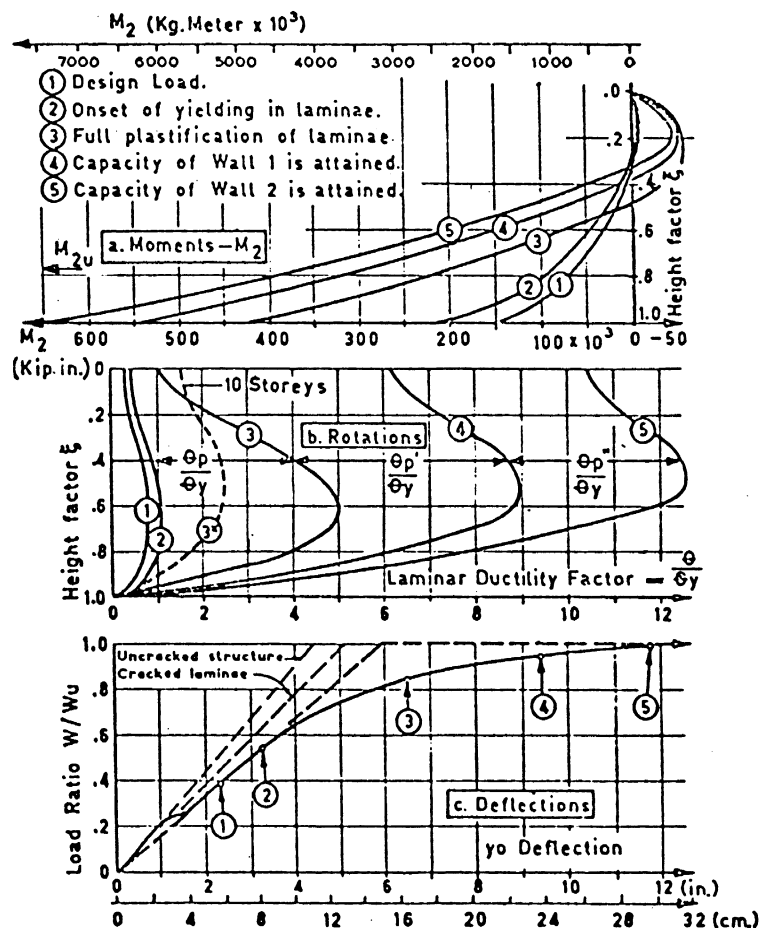
Σχ. 1.22: Στροφές μίας στρώσης ή μίας δοκού συζεύξεως [7].

Για τα 5 αυτά στάδια φορτίσεως υπολογίζονται οι κατανομές ροπών του τοιχώματος 2 και στροφών των δοκών καθύψος ενός 18ορόφου συζευγμένου τοιχώματος (βλ. Σχ. 1.23).

Η μεταβολή των στροφών των στρώσεων δίνεται ως λόγος των πλαστικών στροφών θ_p που υπολογίζονται, προς την στρόφη θ_y που αντιστοιχεί στην διαρροή. Έτσι το διάγραμμα του Σχ. 1.23β εκφράζει τον συντελεστή πλαστιμότητας στροφών των στρώσεων (δοκών συζεύξεως).

Παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη απαίτηση σε πλαστιμότητα την έχουν οι δοκοί στο μέσον του ύψους της κατασκευής. Έτσι, για τον συγκεκριμένο πυρήνα, για να εξαντληθεί η αντοχή και των δύο τοιχωμάτων - στάδιο 5 - η δοκός συζεύξεως στο μέσον του ύψους θα πρέπει να έχει πλαστιμότητα στροφών ίση με 12.

Αν απαιτηθεί ο υπόψη πυρήνας να έχει έναν συνολικό δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων ίσο με 4, τότε η αντιστοιχη μετακίνη-



Σχ. 1.23: Αποτελέσματα ελαστοπλαστικής αναλύσεως ενός 18ορόφου συζευγμένου τοιχώματος [7].

α. Καθύψος κατανομή των ροπών του τοιχώματος 2.

β. Καθύψος κατανομή των πλαστικών στροφών των δοκών.

γ. Μεταβολή του πλευρικού φορτίου συναρτήσει των μετακινήσεων της κορυφής.

ση κορυφής θα είναι 64 cm (βλ. Σχ. 1.23γ) και ο αντίστοιχος δείκτης πλαστιμότητας στροφών της κρίσιμης δοκού συζεύξεως θα είναι 27'.

Ετσι γίνεται σαφές πόσο μεγάλη πλαστιμότητα δοκών συζεύξεως απαιτείται προκειμένου να καταστήσει το όλον σύστημα επαρκώς πλάστιμον.

Βεβαίως, οδηγηθήκαμε σ' αυτά τα αποτελέσματα θεωρώντας ότι όλες οι δοκοί είχαν ίδια αντοχή. Αυτό είχε ως συνέπεια να απαιτούνται μεγάλες πλαστικές στροφές της δοκού στο μέσον του ύψους ώστε να γίνει δυνατή η αστοχία της δοκού στην κορυφή.

Ετσι, η απαίτηση πλαστιμότητας των δοκών μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν η υπολογιστική αντοχή των δοκών συζεύξεως μεταβάλλεται καθύψος του τοιχώματος κατά τρόπον ανάλογο με την μεταβολή της τέμνουσας q που αναπτύσσεται στις δοκούς (βλ. Σχ. 1.21).

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ

Στόχος της έρευνας αυτής ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκών συζεύξεως τοιχωμάτων υποβαλλόμενων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ειδικότερα, είχαμε σκοπό να συγκρίνουμε διαφορετικούς τρόπους οπλίσεως, μερικοί απ'τους οποίους δεν έχουν ξαναερευνηθεί.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήσαν α) ο τρόπος οπλίσεως και β) ο λόγος διατμήσεως $\alpha_s = M/V \cdot h = l/2h$.

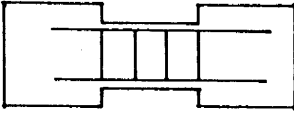
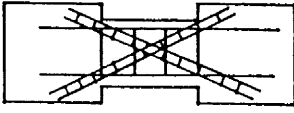
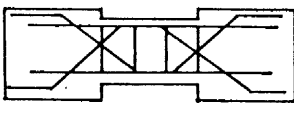

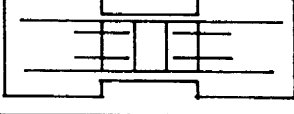
Κατασκευάστηκαν 10 δοκίμια που χωρίζονταν ανά 5 σε δύο ομάδες: Τα δοκίμια της ομάδας Α είχαν λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$ ενώ της ομάδας Β είχαν $\alpha_s = 0.83$.

Η επιλογή αυτών των λόγων διατμήσεως έγινε με κριτήριο τις παρατηρήσεις άλλων ερευνητών. Σύμφωνα με αυτές, οι δοκοί με λόγους διατμήσεως $\alpha_s < 0.75$ εμφανίζουν εντονότερη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς-τους συγκριτικά με τις κλασικές δοκούς, λόγω της αυξημένης επιρροής της διατμήσεως, ενώ για $\alpha_s > 1.0 \div 1.5$ οι δοκοί συζεύξεως συμπεριφέρονται όπως οι κλασικές δοκοί.

Εξετάστηκαν 5 διαφορετικοί τρόποι οπλίσεως στις ομάδες Α, Β (βλ. Πιν. 2.1).

Λεπτομέρειες των τρόπων οπλίσεως καθώς και σχέδια και φωτογραφίες των οπλισμών φαίνονται στην 1η Έκθεση Προόδου (πρβλ. § 3.2).

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις και τρόπος οπλίσεως των δοκιμών της παρούσας έρευνας.

Κωδικός Αριθμός Δοκιμίου	Διάταξη οπλισμών	L (mm)	H (mm)	t (mm)
CB-1A		500	500	130
CB-1B		500	300	130
CB-2A		500	500	130
CB-2B		500	300	130
CB-3A		500	500	130
CB-3B		500	300	130
CB-4A		500	500	130
CB-4B		500	300	130
CB-5A		500	500	130
CB-5B		500	300	130

Συμβολισμοί ονοματολογίας

CB: δοκός συνδέσεως

1: κλασική όπλιση

2: δισδιαγώνιες "κρυφοκολώνες"

3: χιαστί οπλισμοί στις πακτώσεις

4: "βλήτρα-σφιγκτήρες" σε όλο το μήκος της δοκού

5: κοντά-βλήτρα στις πακτώσεις

A: δοκίμιο με $\alpha_s = 0.50$ ($L/H = 1$)

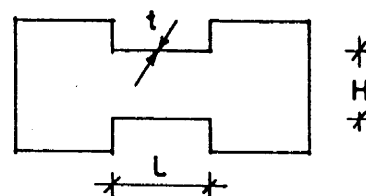
B: δοκίμιο με $\alpha_s = 0.83$ ($L/H = 1.67$)

επομένως,

το όνομα κάθε δοκιμίου φανερώνει τον τρόπο οπλίσεως του και τον λόγο δια-
τιμήσεως της δοκού ($\alpha_s = L/2H$)

Συνολικό πλήθος δοκιμών: 10

(κατασκευάσθηκε και ένα δοκιμαστικό ομοίωμα).



2.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

2.1.1 Σκυροδέμα

Για τον έλεγχο των αντοχών ελήφθησαν κύβοι διαστάσεων 200 mm. Για το κάθε δοκίμιο θραύστηκαν 3 κύβοι μετά πάροδο 28 ημερών απ' την σκυροδέτηση (βλ. 1η Έκθεση Προόδου) και 3 κύβοι την ημέρα εκτελέσεως του πειράματος. Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται οι αντοχές των κύβων την ημέρα του πειράματος, αφού πολλαπλασιαστούν επί 0,85 για να αναχθούν σε ισοδύναμη κυλινδρική αντοχή (βλ. Πίνακα 2.2).

Πίνακας 2.2 - Αντοχές σκυροδέματος δοκιμών

Δοκίμιο	Αντοχή κύβου [kg/cm ²]	Ισοδ.κυλινδρική αντοχή: (2)X0,85 [MPa]
(1)	(2)	(3)
CB-1A	386	32,8
CB-1B	388	33,0
CB-2A	335	28,5
CB-2B	310	26,3
CB-3A	373	31,7
CB-3B	398	33,8
CB-4A	351	29,8
CB-4B	375	31,9
CB-5A	380	32,3
CB-5B	390	33,1

Λεπτομέρειες για την σκυροδέτηση των δοκιμών αναφέρονται στην 1η Έκθεση Προόδου (§ 3.2.4).

2.1.2 Χάλυβας

Για τον προσδιορισμό των τάσεων διαρροής και θραύσεως των οπλισμών έγιναν δοκιμές για όλες τις διαμέτρους των ράβδων που χρησιμοποιήθηκαν (μηχανή AMSLER-LAFFON). Για τις μετρήσεις

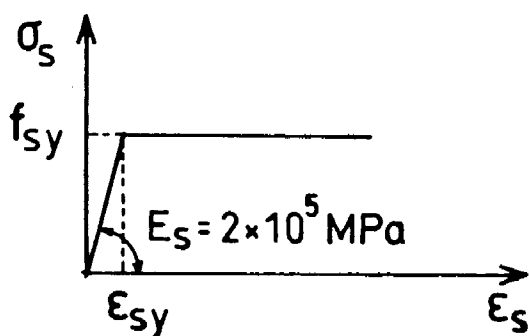
των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε μηχανοσκόπιο HUGENBERGER TENSOMETER. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 - Χαρακτηριστικά ράβδων οπλισμού

Διάμετρος ράβδου [mm]	Τάση διαρροής [MPa]	Τάση θραύσεως [MPa]	Παραμόρφωση διαρροής [ο/οο]
20	450	745	2,2
18	453	724	2,2
14	451	692	2,2
12	484	771	2,4
10	504	764	2,5
8	296	407	1,5
6	281	380	1,4

$$E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$$

Κατά τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν θεωρήθηκε ότι το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα είναι ελαστικό - τελείως πλαστικό (βλ. Σχ. 2.1). Αμελείται δηλαδή καταρχήν η κράτυση.



Σχ. 2.1: Διάγραμμα $\sigma_s - \epsilon_s$ του χάλυβα που χρησιμοποιείται κατά τους υπολογισμούς.

Για την διατήρηση ενιαίου μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα: $E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη διαρροή υπολογίζεται απ' τον λόγο: $\epsilon_{sy} = \sigma_{sy} / E_s$. Η τιμή αυτή διαφέρει ελάχιστα απ' την παραμόρφωση του χάλυβα που μετρήθηκε για την τάση διαρροής κατά τις δοκιμές.

2.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ

Το κάθε δοκίμιο τοποθετείται σε μεταλλικό πλαίσιο (βλ. Σχ. 3.22 1ης Εκθ. Προόδου), πακτώνεται στο ένα άκρο του, επιβάλλονται δε μετακινήσεις στο άλλο άκρο-του το οποίο είναι ελεύθερο να μετακινηθεί.

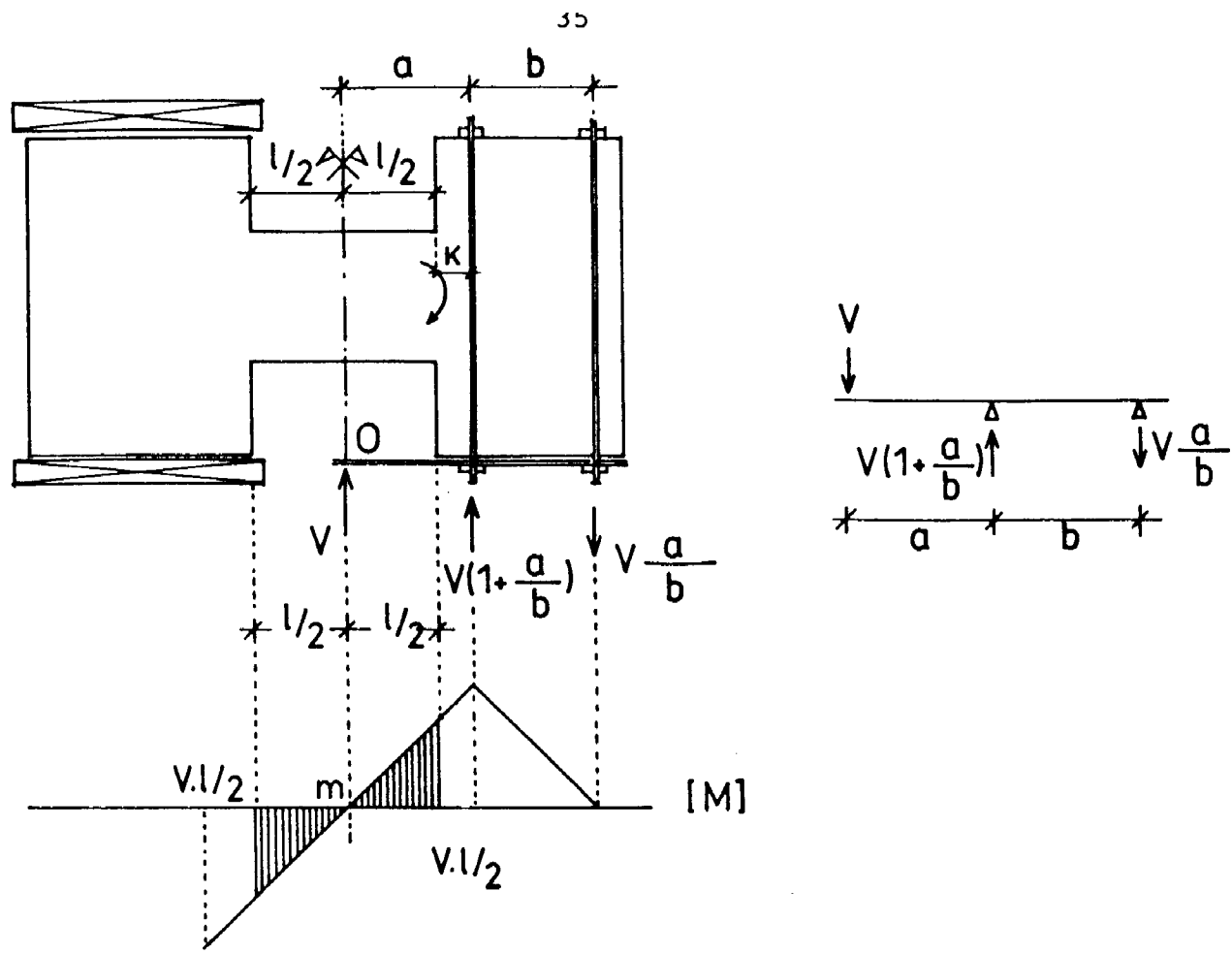
Η πάκτωση επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικών πλακών που "σφηνώνουν" το δοκίμιο στο πλαίσιο, και μέσω ενός υδραυλικού γρύλλου που ασκεί σταθερό θλιπτικό φορτίο στο πακτωμένο τοίχωμα καθόλη τη διάρκεια του πειράματος. Οι μετακινήσεις εγκαρσίως στο επίπεδο του δοκιμίου εμποδίζονται μέσω μεταλλικών αντιστηρίξεων.

Οι μετακινήσεις στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου επιβάλλονται μέσω σερβομηχανισμού, ο άξονας του οποίου συμπίπτει με τον άξονα του δοκιμίου ώστε οι ροπές στο μέσον της δοκού να είναι μηδέν. Ο γρύλλος ασκεί τις μετακινήσεις πάνω σε μεταλλική δοκό η οποία συνδέεται με το ελεύθερο άκρο του δοκιμίου μέσω ράβδων χάλυβα υψηλής αντοχής (ντίζες). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διάταξη φορτίσεως αναφέρονται στην 1η Έκθεση Προόδου.

Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει συνθήκες φορτίσεως ανάλογες με εκείνες τις οποίες αναπτύσσουν οι σεισμικές δυνάμεις σε δοκούς συζεύξεως πραγματικών κατασκευών. Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στη δοκό αντιστοιχούν σε αμφίπακτη δοκό, φαίνονται δε στο Σχ. 2.2. Επαληθεύεται ότι η ροπή στο άκρο της δοκού συζεύξεως είναι:

$$M_{11} = V \frac{a}{b} (b+a-\frac{1}{2}) - V(1+\frac{a}{b})(a-\frac{1}{2}) \longrightarrow M_{11} = V \cdot \frac{1}{2}$$

όπως προκύπτει στερεοστατικά.



Σχ. 2.2 Εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο δοκίμιο μέσω της διατάξεως φορτίσεως.

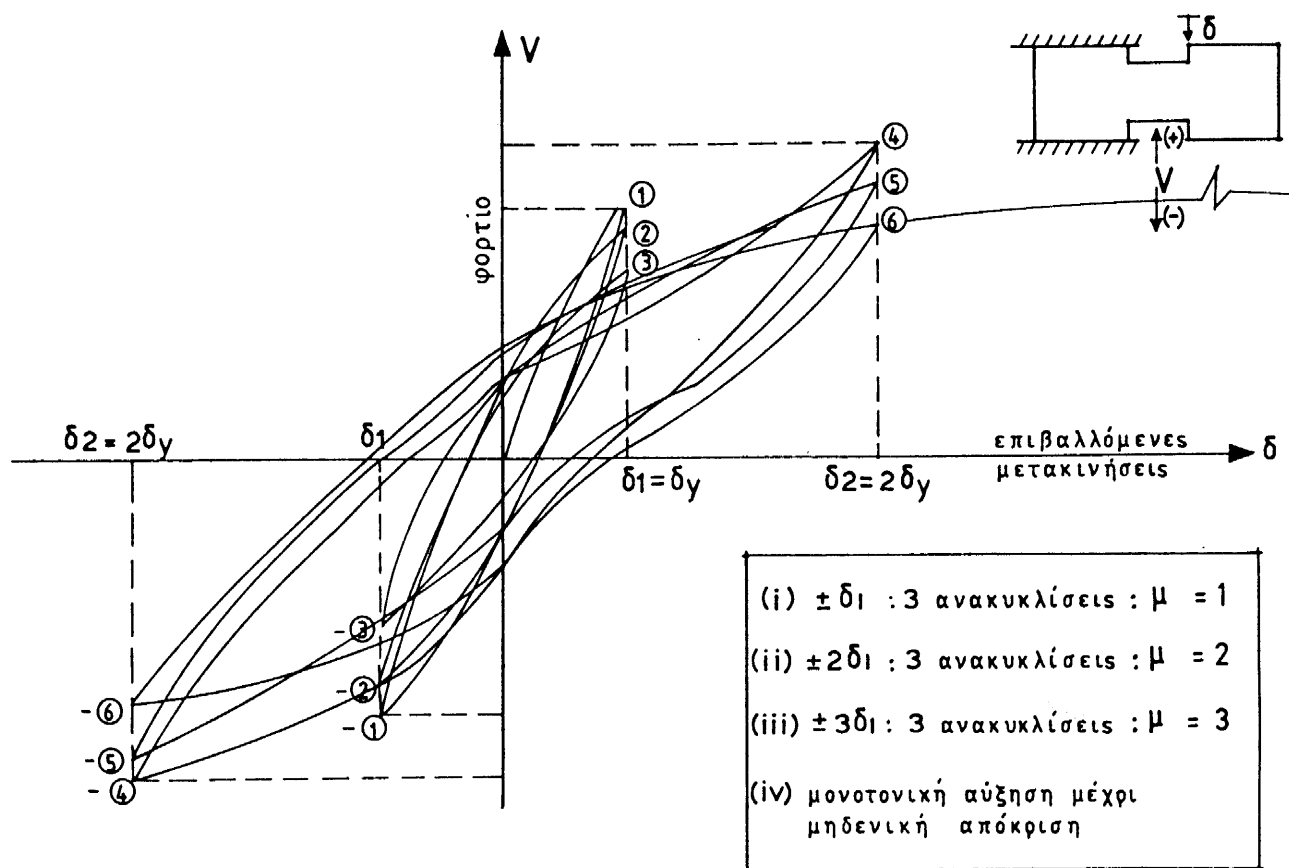
2.3 ΙΣΤΟΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ

Αρχικώς επιβάλλεται στο άκρο της δοκού μετακίνηση δ_1 τέτοια που να προκαλεί διαρροή των κυρίων οπλισμών κάμψεως (οριζόντιων, διαγωνίων ή βλήτρων, αναλόγως με τον τρόπο οπλίσεως). Γίνονται 3 πλήρεις ανακυκλίσεις βάσει αυτής της μετακινήσεως ($\pm \delta_1$).

Κατόπιν γίνονται 3 πλήρεις ανακυκλίσεις σε στάθμη μετακινήσεων ($+ 2\delta_1$) και ακολούθως σε στάθμη ($+ 3\delta_1$).

Τέλος, αν δεν έχει προηγηθεί αστοχία κατά τις προηγούμενες φάσεις φορτίσεως, το δοκίμιο φορτίζεται μονοτονικά έως την αστοχία.

Στο Σχ. 2.3 φαίνεται σχηματικά μέρος της ιστορίας φορτίσεως στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια.



Σχ. 2.3 Ιστορία φορτίσεως των δοκιμίων.

Οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις στο ελεύθερο άκρο της δοκού καταγράφονται μέσω βελομέτρου που είναι τοποθετημένο στη θέση αυτή (βελ. 5, Σχ. 2.4).

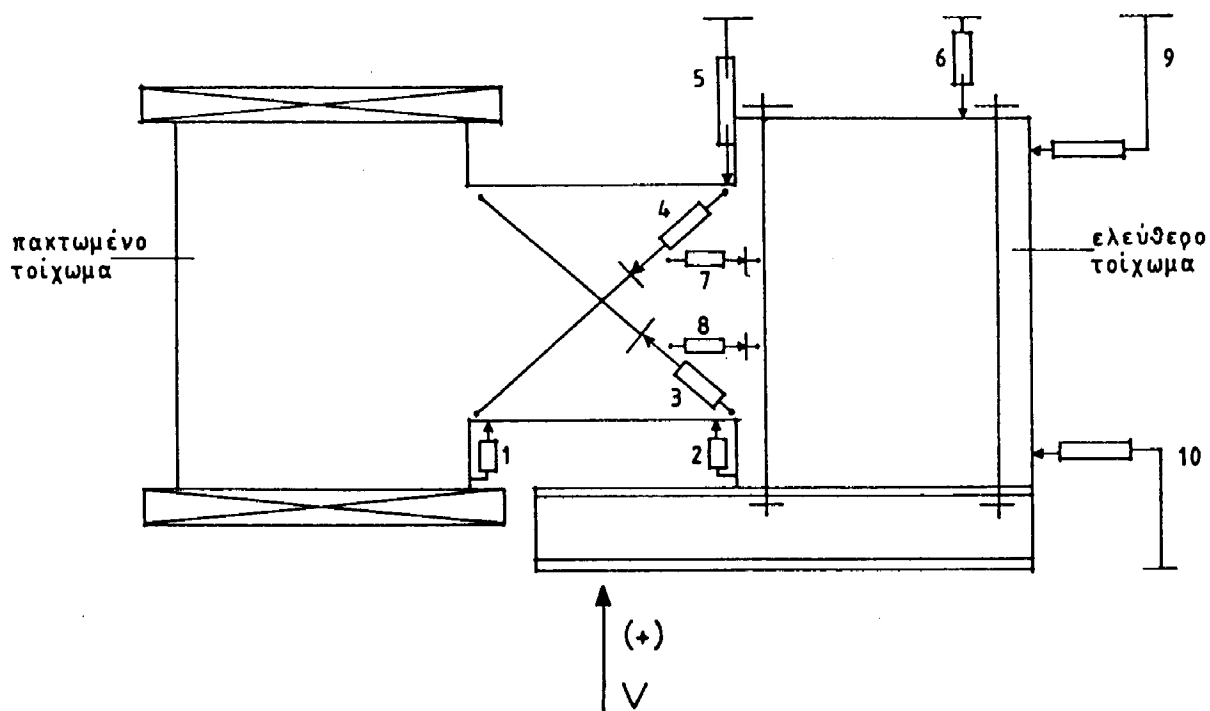
Οι αντίστοιχες τιμές του φορτίου που ασκείται απ' τον γρύλλο λαμβάνονται απευθείας απ' τον σερβομηχανισμό.

2.4 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ

2.4.1 Βελόμετρα

Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν 10 επαγωγικά βελόμετρα (βλ. Σχ. 2.4). Απ' τις καταγραφές των βελομέτρων αυτών μπορούν να προσδιοριστούν:

- α) Η κατακόρυφη μετακίνηση του ελεύθερου άκρου της δοκού συζεύξεως - βελ. 5 -
- β) Η στροφή του ελεύθερου άκρου της δοκού - βελ. 5,6 και 9,10 -
- γ) Η γωνιακή παραμόρφωση της δοκού - βελ. 3,4 -
- δ) Οι σχετικές ολισθήσεις μεταξύ των άκρων της δοκού και των τοιχωμάτων - βελ. 1,2 -
- ε) Η εξέλιξη των κατακόρυφων ρωγμών ολισθήσεως που αναμένονται να εμφανιστούν μεταξύ δοκού και τοιχωμάτων - βελ. 7,8 -

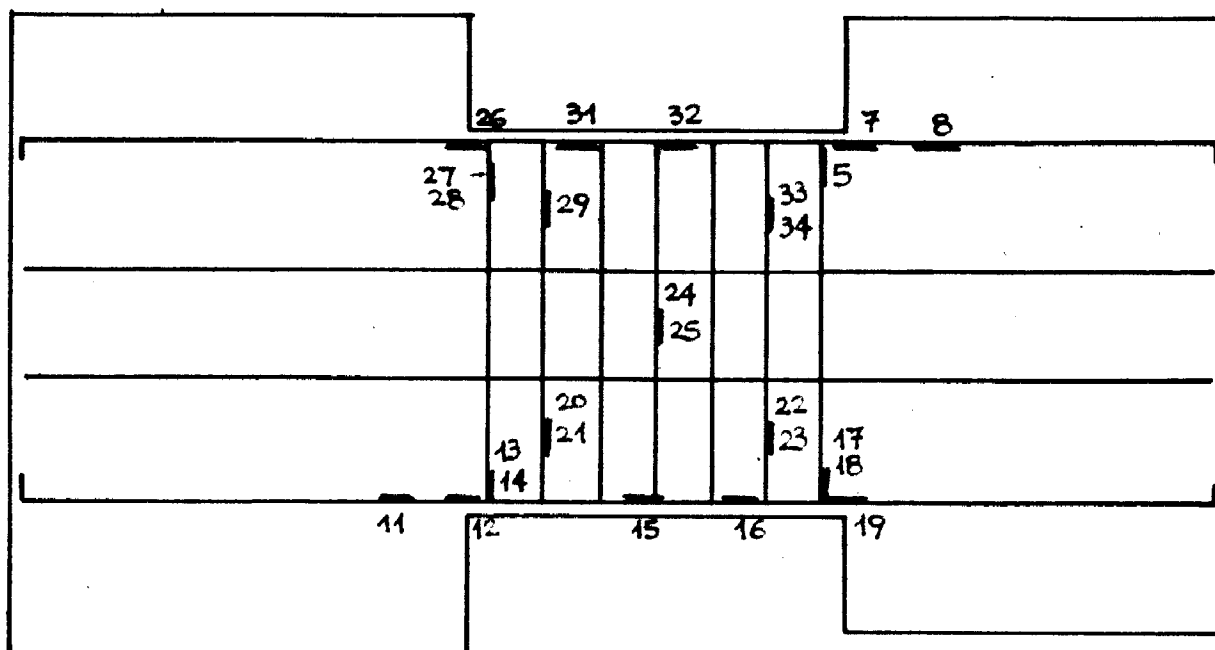


Σχ. 2.4 Θέσεις επαγωγικών βελομέτρων.

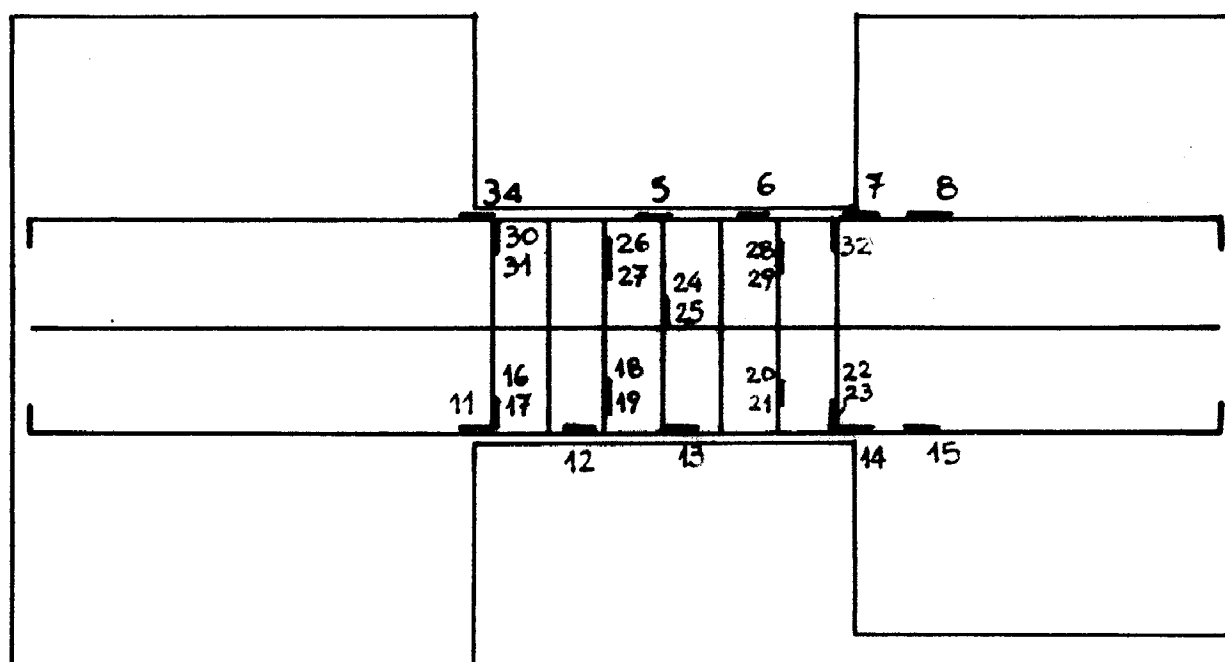
2.4.2 Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (Strain Gauges)

Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων των οπλισμών χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Οι θέσεις των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, σε κάθε δοκίμιο, φαίνονται στα Σχ. 2.5-2.9. Σε όσες θέσεις σημειώνονται δύο αριθμοί (συνδετήρες, διαγώνιοι οπλισμοί) υποδηλώνουν την ύπαρξη δύο ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, ένα στο κάθε σκέλος /ράβδο οπλισμού.

CB - 1A

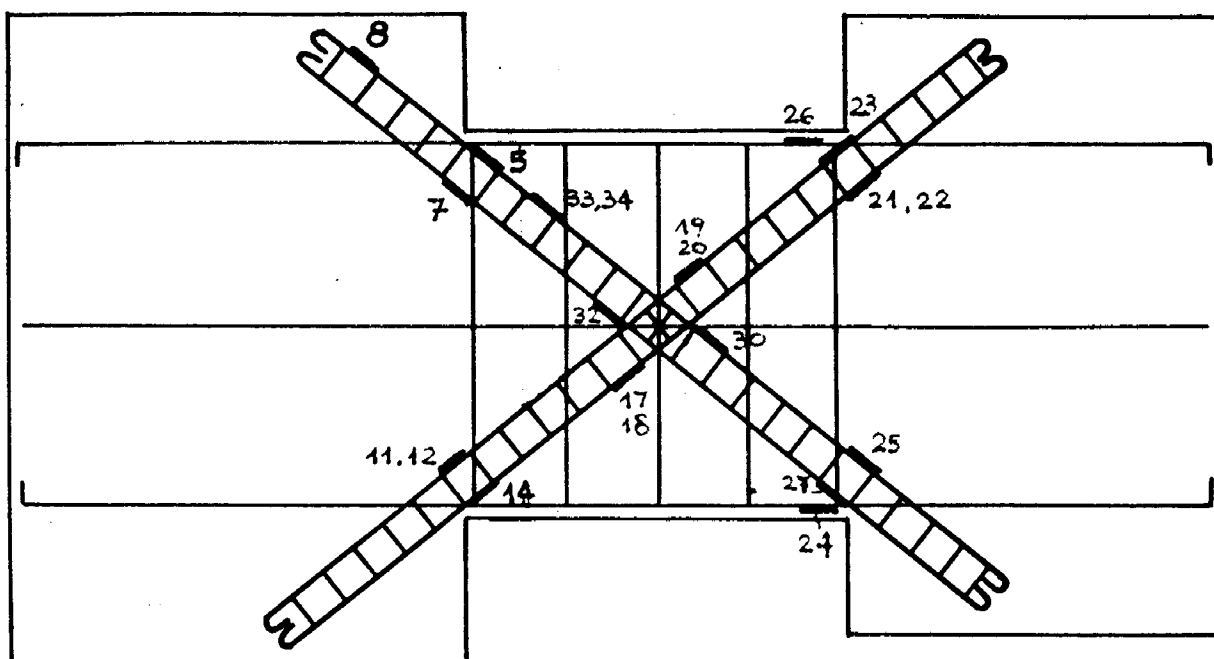


CB - 1B

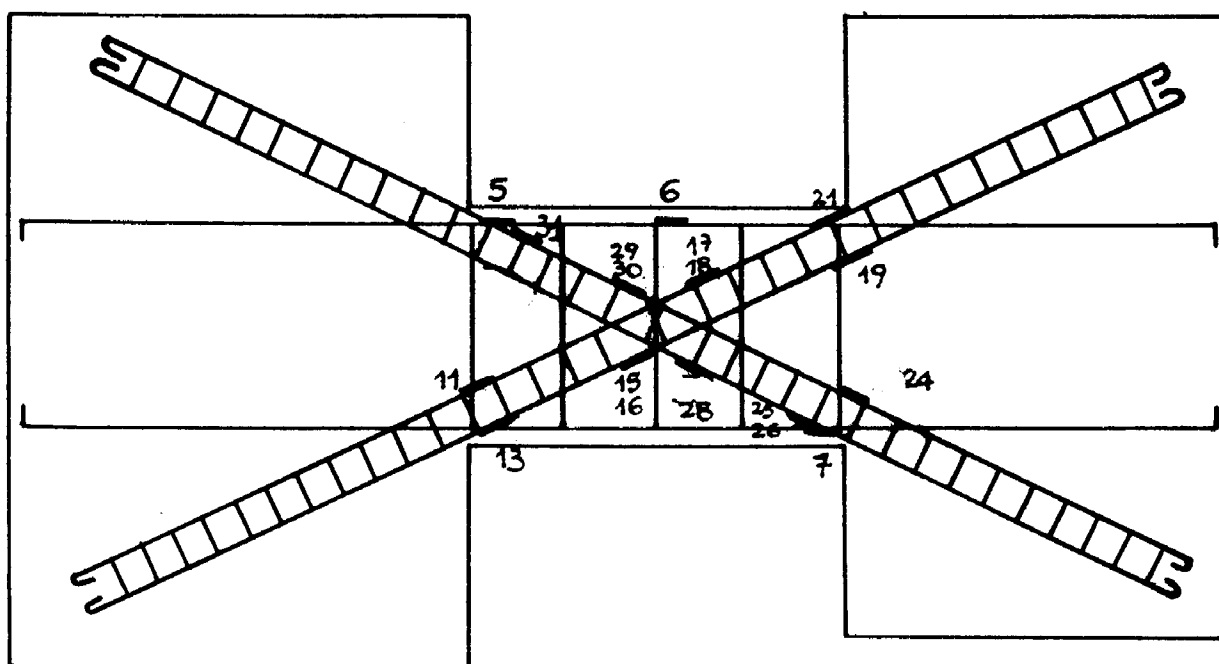


Σχ. 2.5 Θέσεις ηλεκτρομηκυστομέτρων δοκιμών CB-1A,B.

CB - 2A



CB - 2B



Σχ. 2.6 θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων δοκιμίων CB-2A,B.

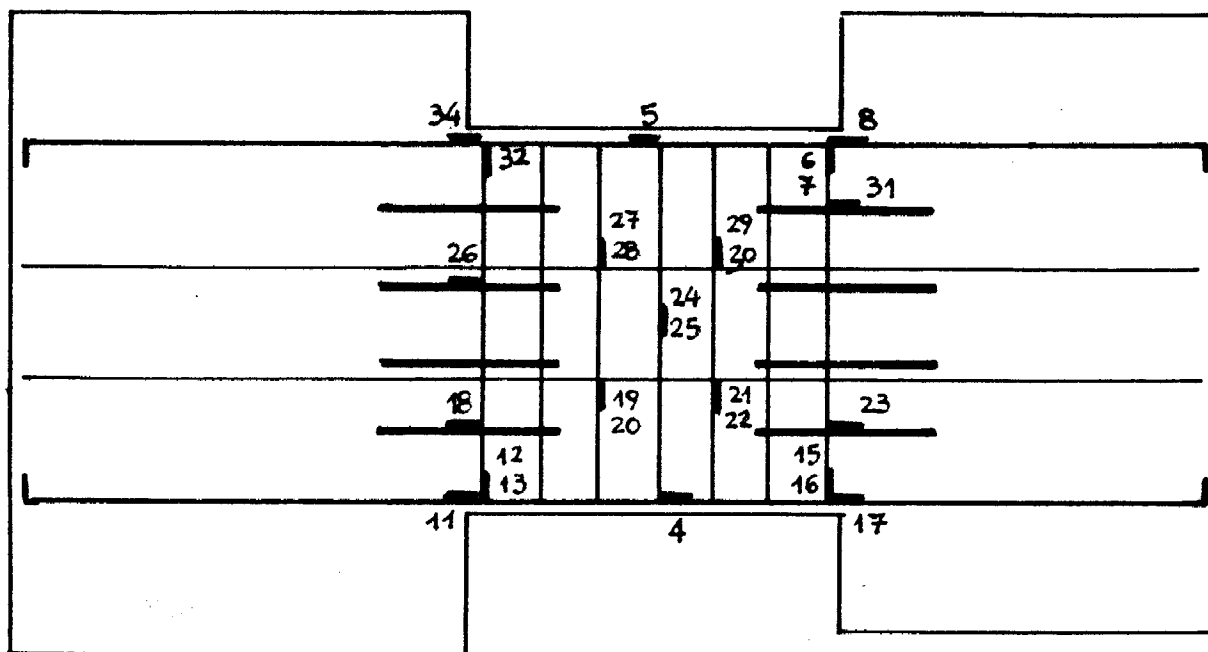
CB - 4A

[illegible]

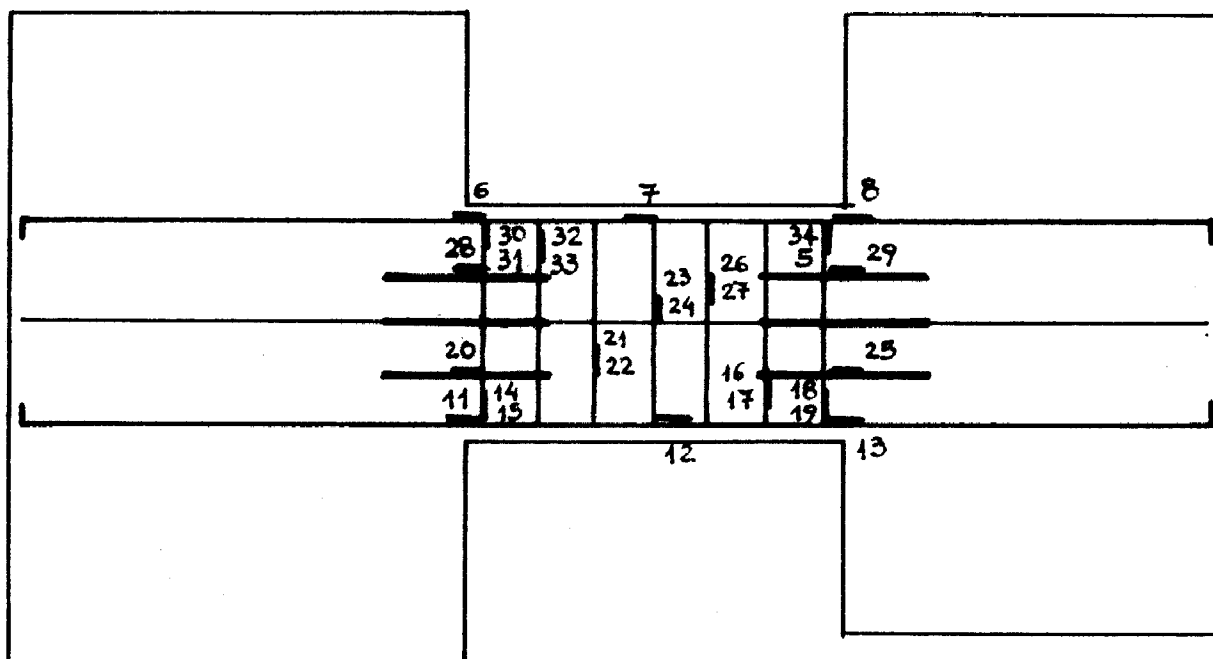
CB - 4B

[illegible]

CB - 5A



CB - 5B



Σχ. 2.9 Θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων δοκιμών CB-5A,B.

3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Τα διαγράμματα φορτίου - επιβαλλόμενων μετακινήσεων των δοκιμίων της παρούσας έρευνας φαίνονται στα Σχ. 3.1-3.5.

Οι δοκοί με τον μικρό λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$ - ομάδα Α - ανέλαβαν μεγαλύτερες τέμνουσες απ' τις δοκούς με $\alpha_s = 0.83$ - ομάδα Β -, εμφάνισαν όμως και μεγαλύτερη μείωση αποκρίσεως ΔV κατά τις ανακυκλίσεις, για σταθερή στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων (πρβλ. § 5). Επί πλέον, το πλήθος "n" των ανακυκλίσεων προ της αστοχίας ήταν μεγαλύτερο στις δοκούς με λόγο $\alpha_s = 0.83$ (βλ. Πίνακα 3.1).

Ετσι, κι απ' την μορφή των διαγραμμάτων V-δ επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι δοκοί συζεύξεως με τον μεγαλύτερο λόγο διατμήσεως συμπεριφέρονται περισσότερο πλαστικά (μεγαλύτερα n, μικρότερες ΔV).

Οι τιμές των τεμνουσών που αντιστοιχούν στις εκάστοτε μέγιστες στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων (κορυφές των κύκλων φορτίσεως) φαίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.1, 5.2 στο Κεφάλαιο 5 (περί μείωσης της αποκρίσεως λόγω ανακυκλίσεων).

α) Δοκίμια CB-1A,B

Τα δοκίμια αυτά που ήσαν οπλισμένα όπως οι κλασικές δοκοί εμφανίζουν έντονη στένωση (pinching) στο μέσον του βρόχους (Σχ. 3.1). Η στένωση αυτή, που γίνεται πιο έντονη για μεγαλύτερες στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων ($n \geq 4$, $\delta \geq 2\delta_y$), οδηγεί σε μικρότερη καταναλισκόμενη ενέργεια (πρβλ. §8) και είναι χαρακτηριστική της συμπεριφοράς των ψαθυρών στοιχείων.

β) Δοκίμια CB-2A,B

Οι βρόχοι υστερήσεως των δοκιμίων με δισδιαγώνιο οπλισμό δεν εμφάνισαν στένωση στο μέσον-τους (βλ. Σχ. 3.2). Η μορφή αυτή των βρόχων επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις άλλων ερευνητών (πρβλ. § 1.5) και είναι ενδεικτική πλαστικής συμπεριφοράς. Οφείλεται στο γεγονός ότι οι εξωτερικές δυνάμεις στα δοκίμια αυτά μεταφέρονται κυρίως μέσω των διαγωνίων οπλισμών και όχι μέσω του

σκυροδέματος, επομένως η μορφή των βρόχων αντιστοιχεί στη συμπεριφορά του χάλυβα.

γ) Δοκίμια CB-3A,B

Οι δοκοί με χιαστί οπλισμούς στα άκρα-τους εμφανίζουν και αυτές στένωση στο μέσον των βρόχων-τους (Σχ. 3.3), η οποία, όμως, είναι μικρότερη από εκείνη των κλασικώς οπλισμένων δοκιμών.

Το δοκίμιο CB-3A, πριν απ' την φόρτιση που φαίνεται στο Σχ. 3.3α είχε υποβληθεί σε δύο πλήρεις κύκλους διαρροής ($\delta_y = \pm 8.50$ mm). Η δοκιμή διακόπηκε γιατί παρουσιάστηκαν προβλήματα στη διάταξη φορτίσεως και επαναλήφθηκε άλλη ημέρα. Η μορφολογία ρηγματώσεως μετά το πέρας της 1ης δοκιμής φαίνεται στην Φωτ. 28 του κεφ. 4.

Κατά την τελική δοκιμή το δοκίμιο συμπεριφέρεται ως "προφορτισμένο", εμφανίζει, δηλαδή, αυξημένες ακαμψίες κατά τα πρώτα στάδια φορτίσεως. Αυτό είναι εμφανές τόσο απ' την μορφή του διαγράμματος V-δ (Σχ. 3.3α) όσο κι απ' τις τιμές της ακαμψίας (βλ. Σχ. 6.7α, 6.8α).

δ) Δοκίμια CB-4,5

Οι δοκοί που ήσαν οπλισμένες με βλήτρα, είτε σε όλο το μήκος είτε μόνον στα άκρα-τους, συμπεριφέρθηκαν ψαθυρά (βλ. Σχ. 6.4, 6.5). Καί στις τέσσερεις δοκούς η μέγιστη τέμνουσα αναπτύχθηκε στον 1ο θετικό κύκλο διαρροής. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό-τους είναι το πολύ μεγάλο εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως της πρώτης ανακυκλίσεως σε κάθε στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων ($n = 1,4$) συγκριτικά με το εμβαδόν των βρόχων των άλλων δύο κύκλων στην ίδια στάθμη μετακινήσεων ($n = 2,3$ και $5,6$). Παρατηρείται, επίσης, και μεγάλη μείωση της αποκρίσεως των δοκιμών αυτών, για σταθερή στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων (πρβλ. §5).

Το δοκίμιο CB-5A (Σχ. 6.5α) υποβλήθηκε σε διαφορετική ιστορία φορτίσεως απ' τα άλλα δοκίμια. Κατά τον 1ο κύκλο φορτίσεως επιβλήθηκε $\delta = 5.2$ mm, χωρίς όμως να διαρρεύσει ο οπλισμός. Η διαρροή συνέβη στον 2ο κύκλο για $\delta_y = 12$ mm. Στην στάθμη

αυτή μετακινήσεων έγιναν 3 ανακυκλίσεις ($n = 2, 3, 4$). Ο 5ος κύκλος έγινε σε $\delta = 3\delta_y = 36\text{mm}$, και όχι σε στάθμη $\delta = 2\delta_y$ όπως στα άλλα δοκίμια. Αυτό οφειλόταν σε προβλήματα στην διάταξη φορτίσεως.

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών τεμνουσών των δοκιμών. Απ' τις τιμές της στήλης 9 παρατηρούμε ότι στα δοκίμια CB-2,3,4 η μέγιστη τέμνουσα $V_{\max, \text{πειρ.}}$ που αναπτύχθηκε κατά το πείραμα ήταν 25-50% μεγαλύτερη απ' την αντίστοιχη θεωρητική αντοχή $V_{u, \text{θεωρ.}}$.

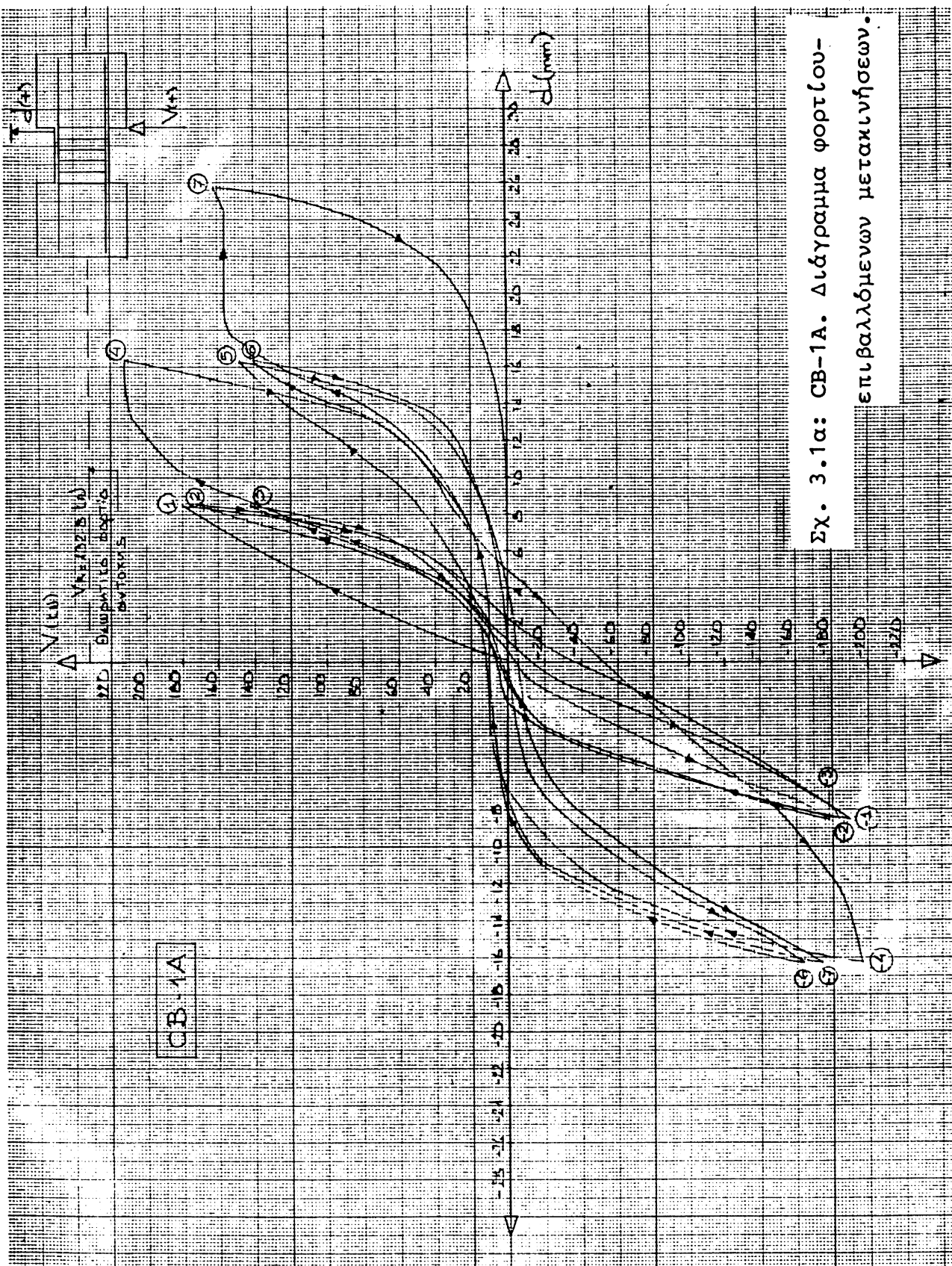
Η καμπτική αντοχή M_R των δοκών, καθώς και η αντοχή-τους V_R σε τέμνουσα (στήλες (8), (7) Πίνακα 3.1) υπολογίστηκαν σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο κεφ. 4 της 1ης Εκθέσεως Προόδου, και για τις αντοχές χάλυβα και σκυροδέματος που μετρήθηκαν πειραματικά.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμών της παρούσας έρευνας.

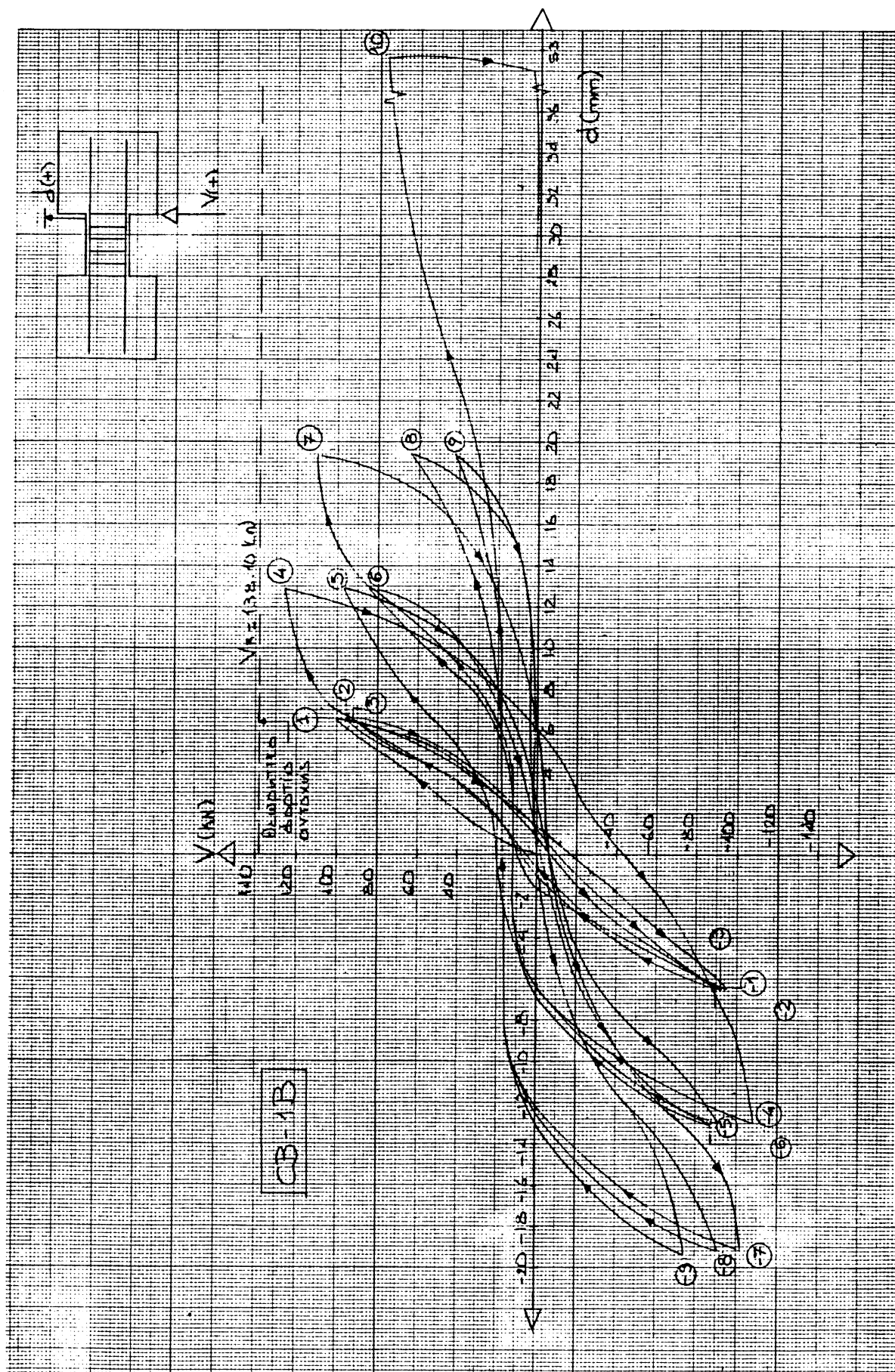
α/α δοκιμίου	Πειραματικά							$\frac{V_{\max}^{\text{πειρ.}}}{V_u^{\text{θεωρ.}}}$
	n	δ_y (mm)	$V_{d, cr.}$ (kN)	V_y (kN)	V_{\max} (kN)	V_R (kN)	$V (M_R)$ (kN)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
CB-1A	7	7.8	179	179	212	221	229	0.96
CB-1B	10	6.4	63	100	124	128	122	1.02
CB-2A	10	7.4	136	214	283	212	204	1.40
CB-2B	10	8.5	101	115	170	187	112	1.51
CB-3A	9	8.5	150	183	302	221	229	1.37
CB-3B	10	6.4	99	121	151	129	122	1.25
CB-4A	7	10.5	162	282	282	222	451	1.27
CB-4B	6	10.8	88	162	162	130	141	1.25
CB-5A	5	12.0	152	237	237	221	229	1.07
CB-5B	7	11.2	100	130	130	128	122	1.07

- (2) n : πλήθος ανακυκλίσεων πριν απ' την αστοχία.
- (3) δ_y : μετακίνηση που προκαλεί διαρροή του διαμήκους οπλισμού.
- (4) $V_{d,cr.}$: φορτίο εμφανίσεως της 1ης διαγώνιας ρωγμής (κατά τον πρώτο θετικό κύκλο).
- (5) V_y : φορτίο που αντιστοιχεί στην μετακίνηση διαρροής δ_y
- (6) V_{max} : μέγιστο φορτίο που αναπτύχθηκε.
- (7) V_R : θεωρητική αντοχή σε τέμνουσα της δοκού.
- (8) $V_{(M_R)}$: τέμνουσα που αντιστοιχεί στην θεωρητική καμπτική αντοχή της δοκού ($V = 2M_R/l$).
- (9) : ο λόγος της τέμνουσας της (6) προς την μικρότερη απ' τις τέμνουσες των (7), (8).

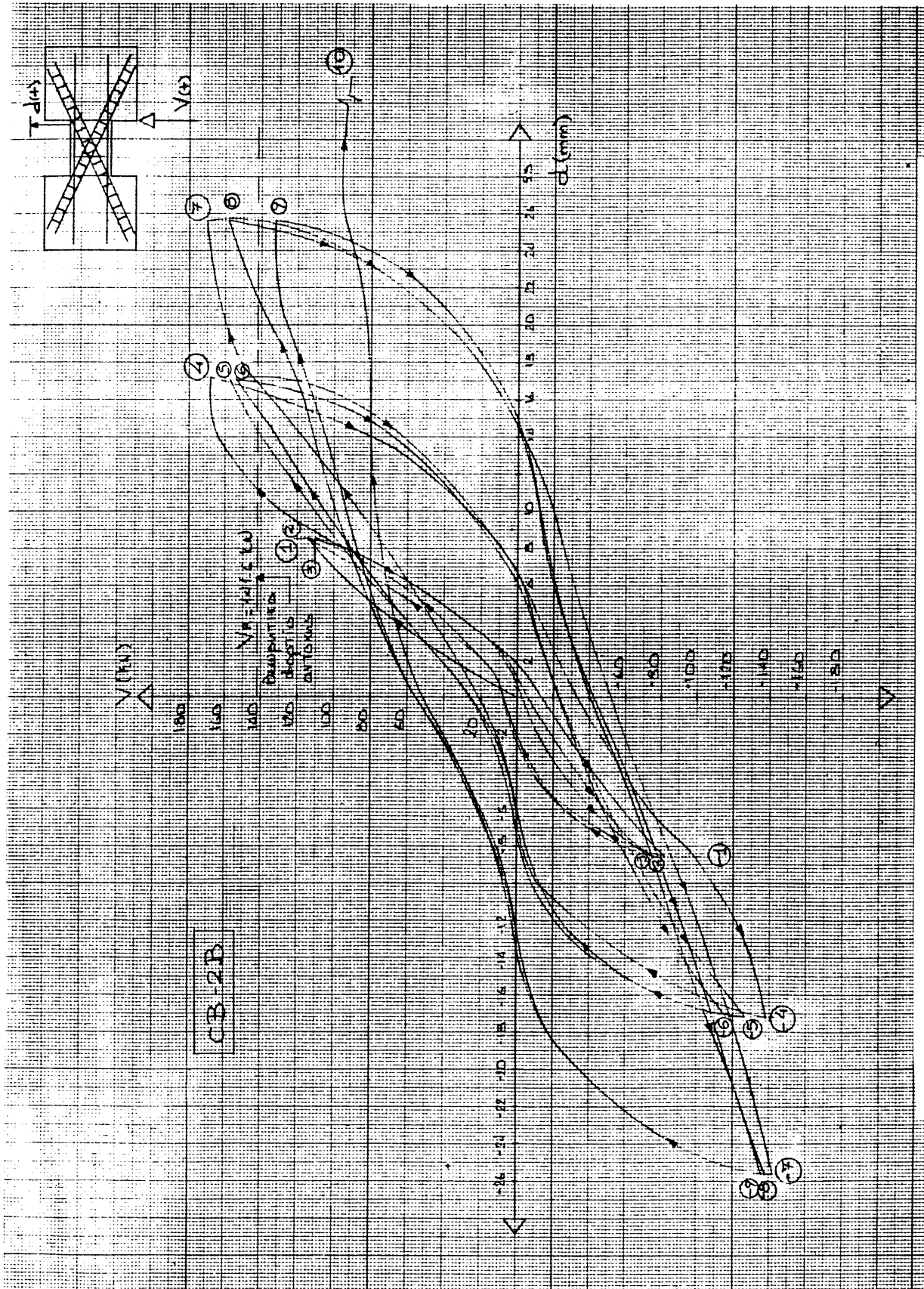
Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ανάμεσα στη θεωρητική και στην πραγματική τιμή μέγιστου φορτίου οφείλουν να γίνουν αντικείμενο ειδικότερης διερευνήσεως, η οποία θα ακολουθήσει σε μεταγενέστερο στάδιο.

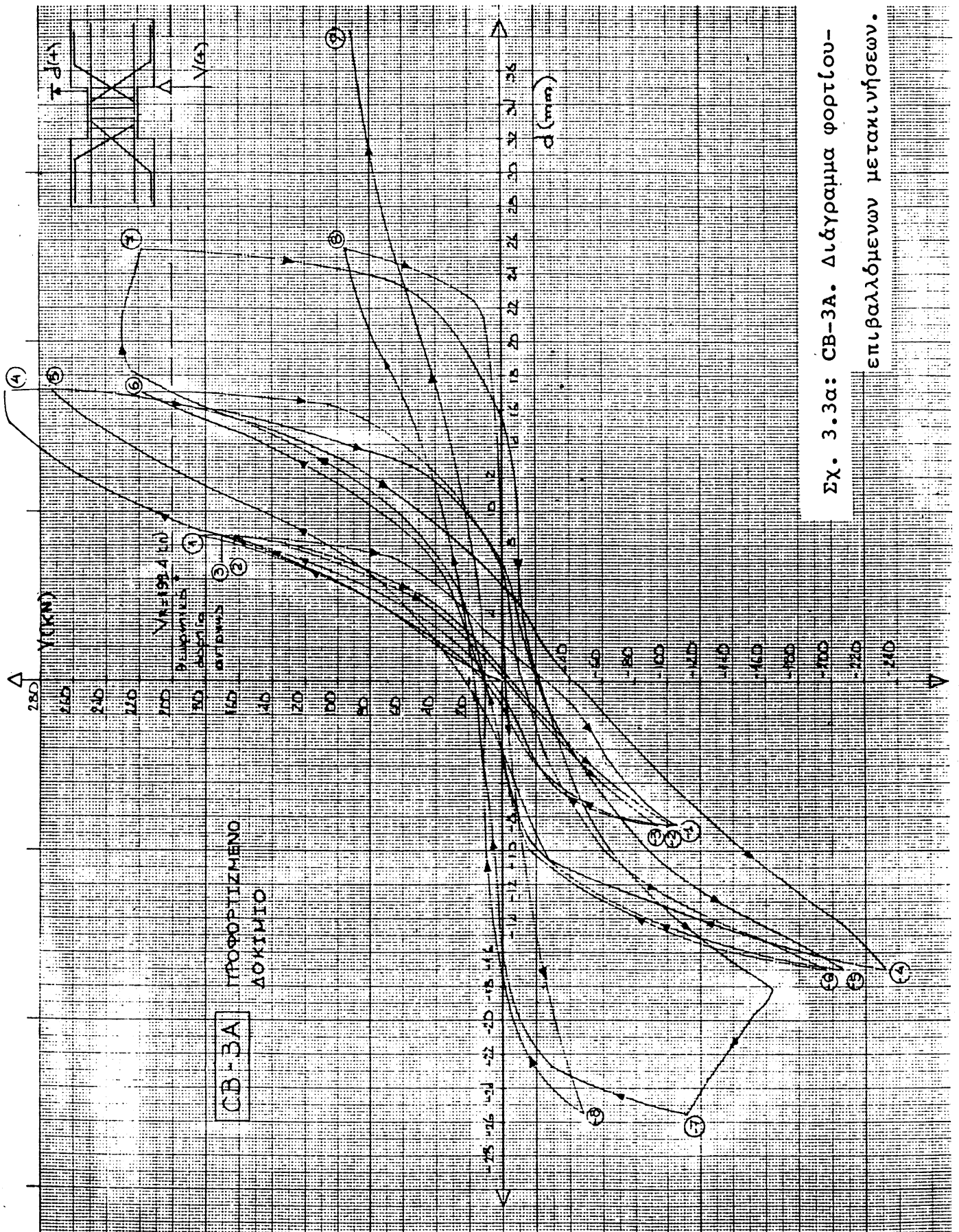


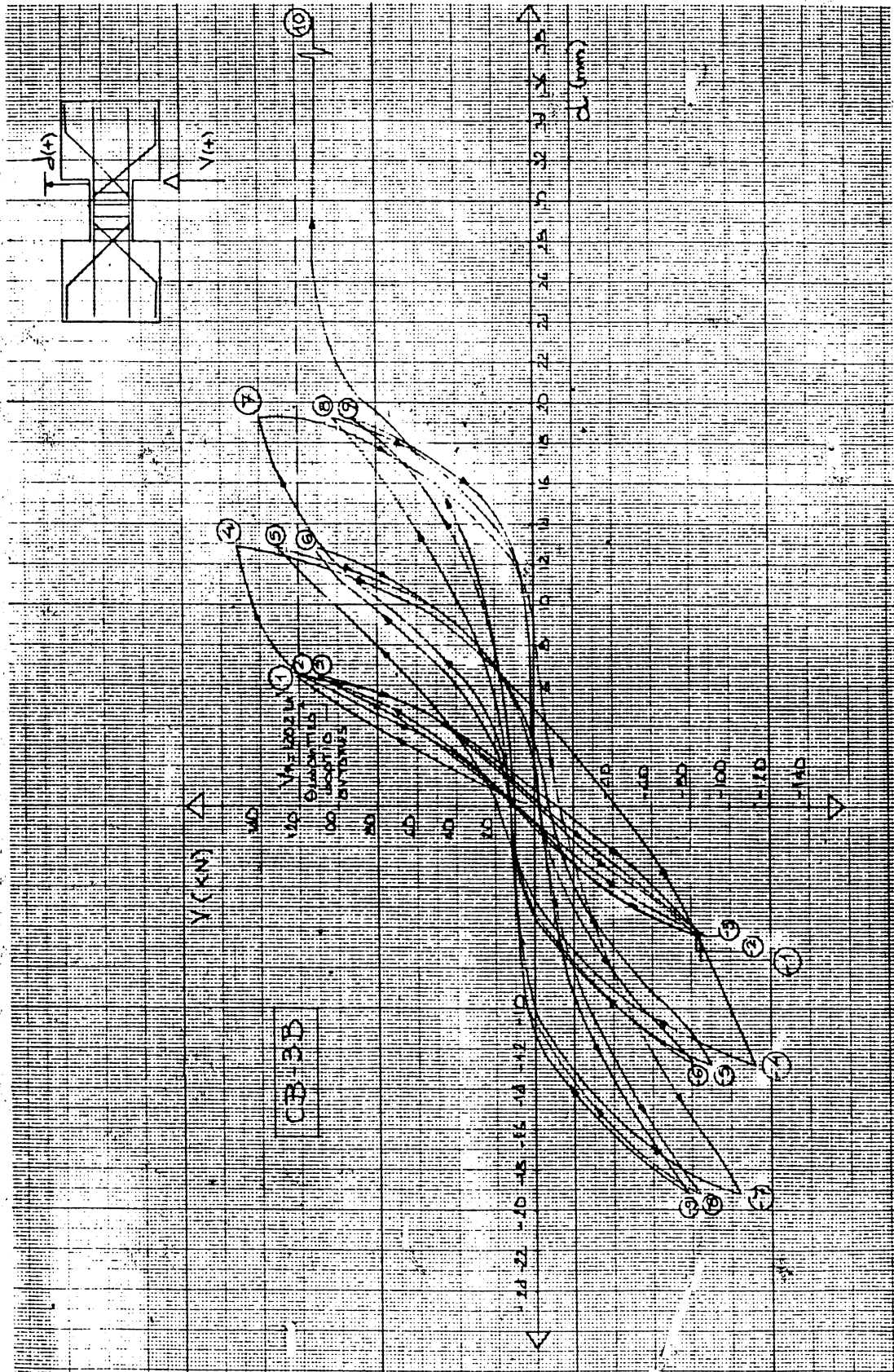
ΣΧ. 3.1α: CB-1A. Διάγραμμα φορτίου-επιβαλλόμενων μετακινήσεων.



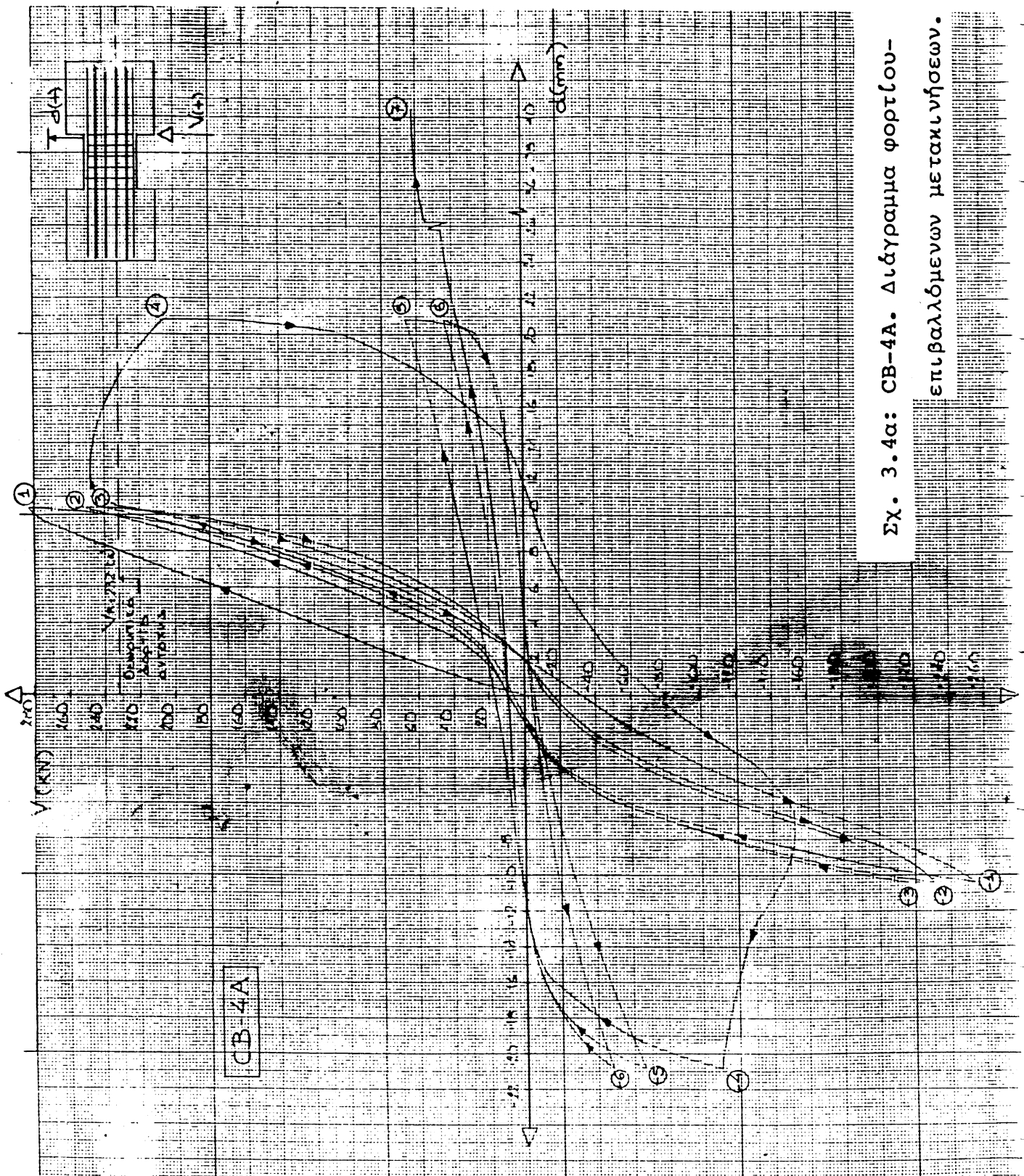
Σχ. 3.1β: CB-1B. Διάγραμμα φορτίου-επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

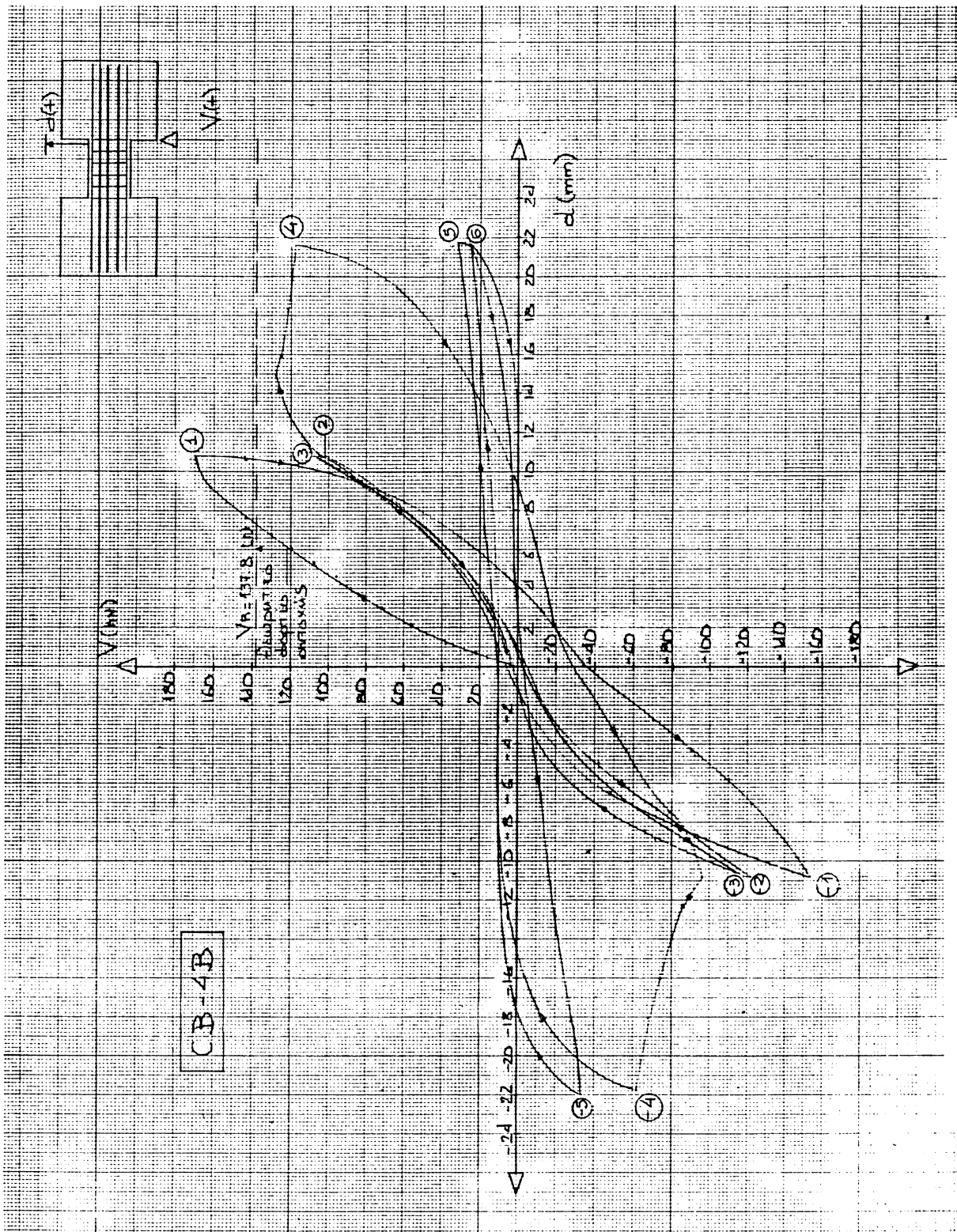




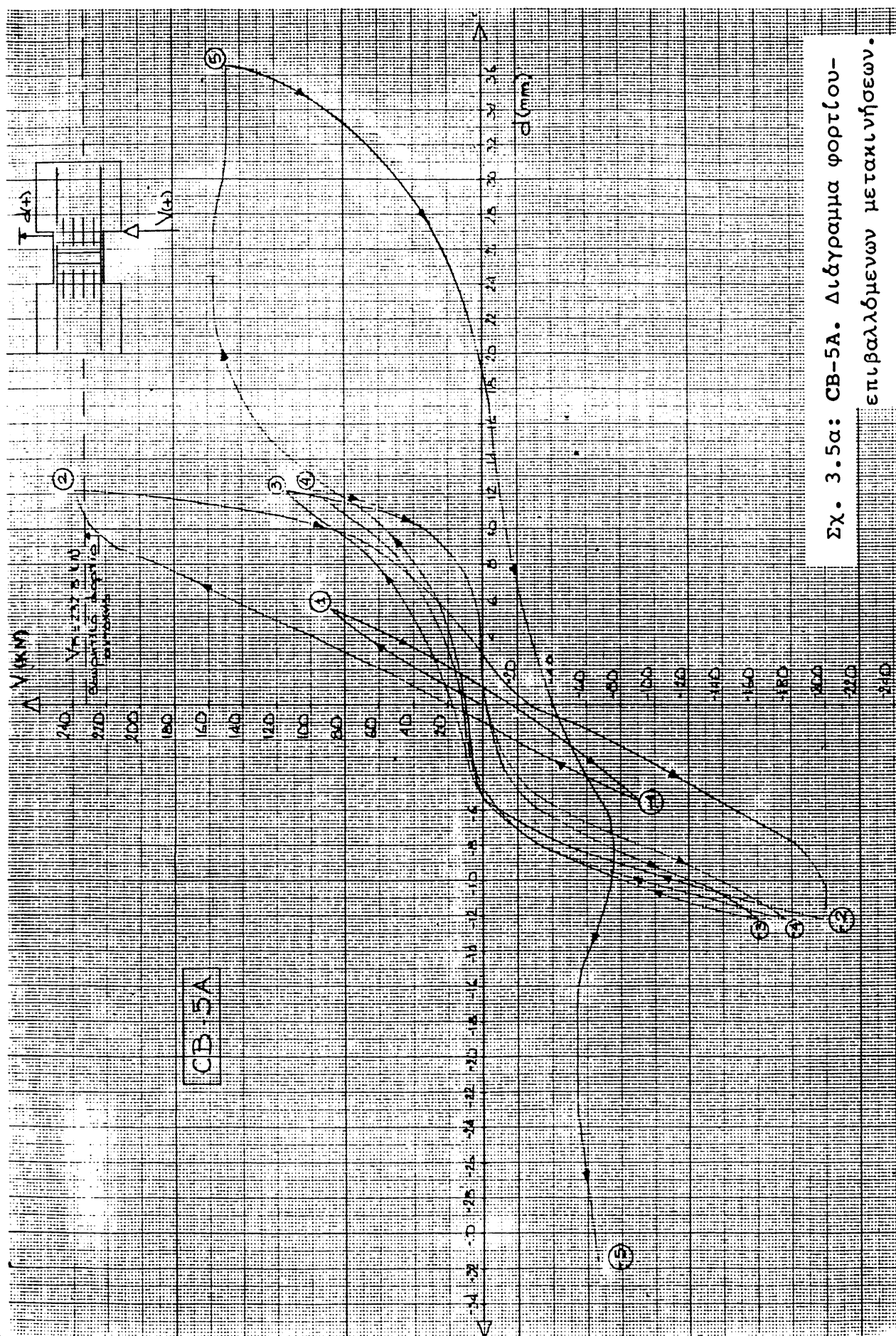


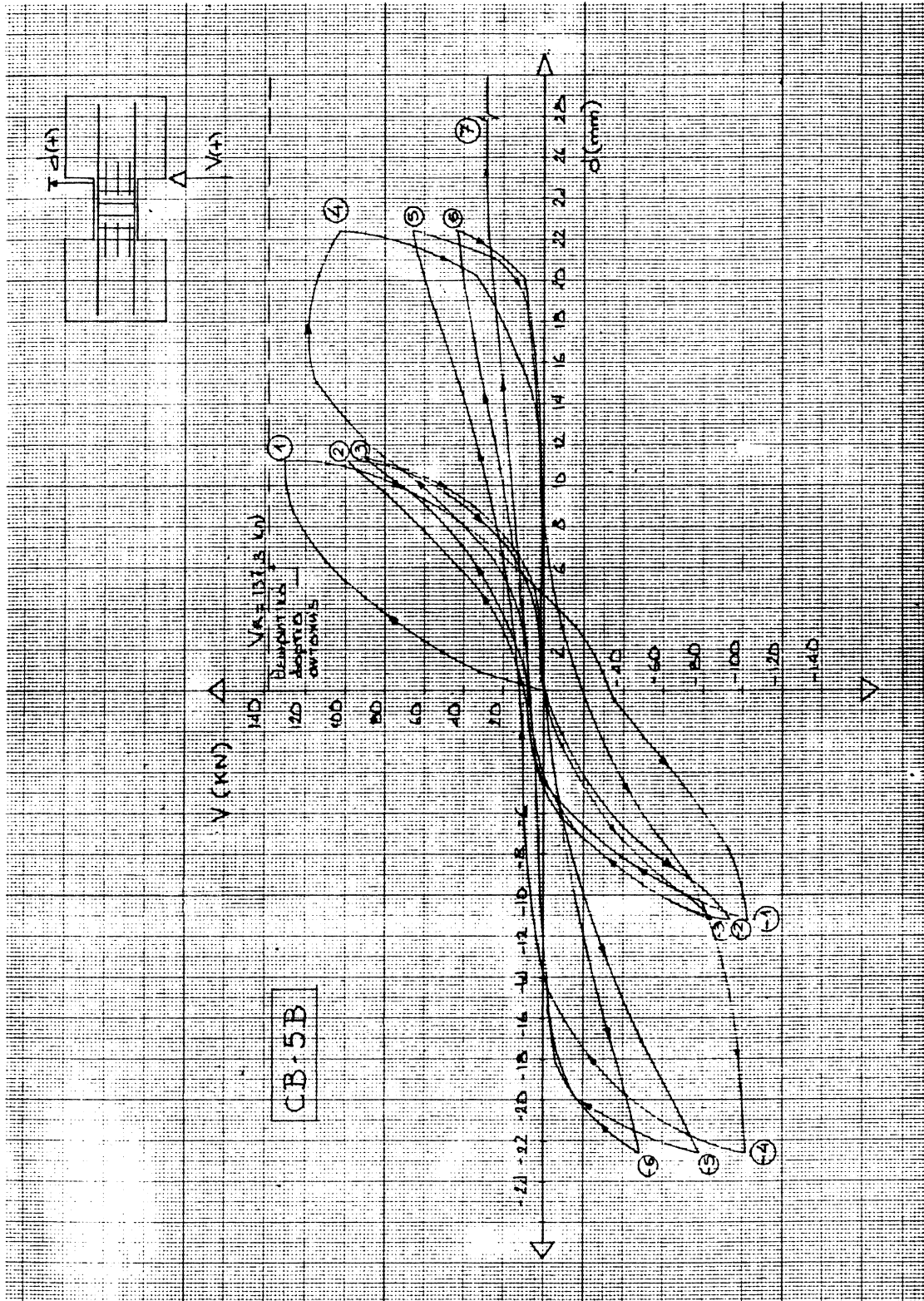
Σχ. 3.3β: CB-3B. Διάγραμμα φορτίου-επιβαλλόμενων μετακινήσεων.





Σχ. 3.4β: CB-4B. Διάγραμμα φορτίου-επιβαλλόμενων μετακινήσεων.





Σχ. 3.5β: CB-5B. Διάγραμμα φορτίου-επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

4. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΣ

Στο κεφάλαιο αυτό σχολιάζεται η μορφολογία ρηγματώσεως και ο τρόπος αστοχίας των δοκών συζεύξεως της παρούσας έρευνας. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των δοκιμών με διαφορετικό λόγο διατμήσεως και με τον ίδιο τρόπο οπλίσεως.

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, σημειώνονται με μαύρο χρώμα οι ρωγμές που εμφανίστηκαν στις 3 πρώτες ανακυκλίσεις στην μετακίνηση διαρροής: $\mu = 1$, με κόκκινο χρώμα οι ρωγμές που άνοιξαν για $\mu = 2$ ($n = 4-6$), ενώ με πράσινο χρώμα οι ρωγμές που άνοιξαν σε μεγαλύτερες μετακινήσεις ($n \geq 7$).

Η περιγραφή των ρωγμών αναφέρεται πάντοτε στην ίδια όψη για όλα τα δοκίμια (όψη Α). Χάριν πληρέστερης όμως εικόνας της παθολογικής εικόνας των δοκιμών, υπάρχουν και ορισμένες φωτογραφίες των βλαβών στην όψη Β.

4.1 ΔΟΚΙΜΙΑ 1Α, 1Β (κλασική όπλιση)

Η δοκός CB-1Α, με λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.5$, παρουσίασε απ' τον πρώτο κι'όλας κύκλο ρωγμή κατά μήκος της κυρίας διαγωνίου. Με την πρόοδο των ανακυκλίσεων δημιουργήθηκε πλέγμα διαγωνίων ρωγμών. Η δοκός αστόχησε λόγω εφελκυσμού κατά μήκος της αρχικής διαγώνιας ρωγμής (Φωτ. 3,4).

Παρατηρήθηκαν επίσης κατακόρυφες ρωγμές ολισθήσεως στις διατομές συνδέσεως με τα τοιχώματα (φωτ. 1-4). Στο αριστερό άκρο για $n = 4$ το εύρος μιάς τέτοιας ρωγμής έφτασε τα 2 mm. Οι ρωγμές αυτές όμως δεν εξελίχθηκαν υπό μεγαλύτερες στάθμες φορτίου.

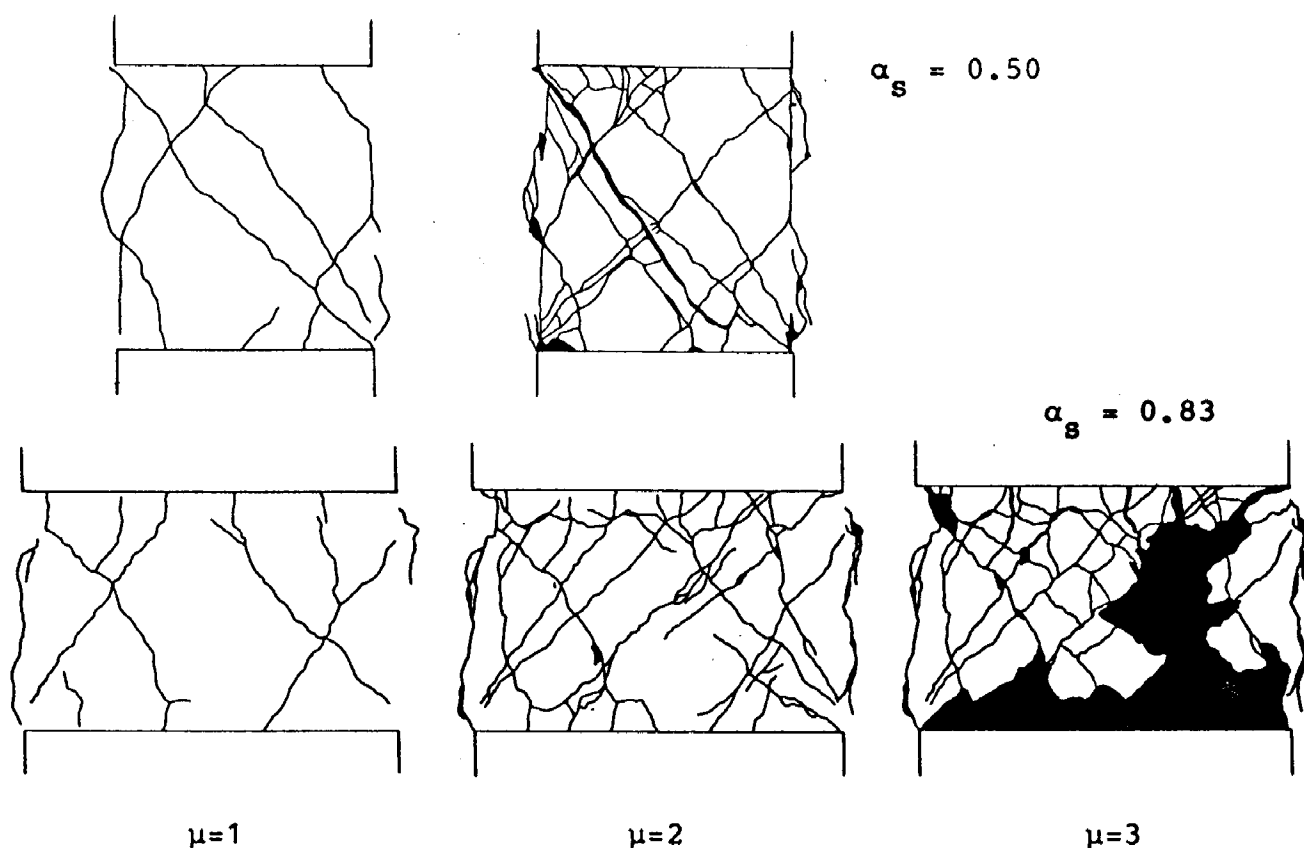
Η δοκός CB-1Β εμφάνισε αρχικά χιαστί ρωγμές κοντά στα άκρα-της (βλ. φωτ. 5, Σχ. 4.1β). Ρωγμή κατά τη διεύθυνση της κυρίας διαγωνίου παρουσιάστηκε μόνο για $n = 5$ αλλά δεν επηρέασε την αστοχία της δοκού. Η δοκός αστόχησε θλιπτοδιατμητικά πάνω στα ακραία-της τμήματα λόγω διευρύνσεως των χιαστί αρχικών ρωγμών. Η αστοχία συνοδεύτηκε και από εκτεταμένες αποφλοιώσεις (Φωτ. 7,8).

Κατακόρυφες ρωγμές ολισθήσεως στη σύνδεση δοκού-τοιχώμα-

τος εμφανίστηκαν, το εύρος-τους όμως παρέμεινε πολύ μικρό.

Επί πλέον, στην δοκό αυτή παρουσιάστηκε αστοχία συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος κατά μήκος των οπλισμών κάμψεως (βλ. Φωτ. 7,8). Στην κάτω παρειά της δοκού μάλιστα, αποκαλύφθηκαν και οι οπλισμοί, μετά από αποκόλληση της επικάλυψης.

Γενικώς η δοκός 1B ($\alpha_s = 0.83$) παρουσίασε μικρότερου εύρους και εντάσεως ρηγματώση απ'ότι η δοκός 1A με τον μικρότερο λόγο διατμήσεως ($\alpha_s = 0.50$) - φωτ. 2,6 -.



Σχ. 4.1: Μορφολογία ρηγματώσεως δοκών CB-1A,B (κλασική όπλιση).

Ο τρόπος αστοχίας των δοκιμών 1A, 1B επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας στην περίπτωση των κλασικώς οπλισμένων δοκών συζεύξεως (πρβλ. §1.3.1). Δηλαδή ότι οι δοκοί με $\alpha_s < 0.75$ στις οποίες ο οπλισμός διατμήσεως δεν επαρκεί για την ανάληψη όλης της τέμνουσας αστοχούν λόγω εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της κυρίας διαγωνίου.

Ο σχεδιασμός έναντι τέμνουσας του CB-1A είχε γίνει λαμβά-

νοντας υπόψη και τη συνεισφορά του σκυροδέματος. Η φέρουσα ικανότητα των συνδετήρων ήταν $V_W = 170 \text{ kN}$, ενώ η μέγιστη τέμνουσα που αναπτύχθηκε ήταν $V = 212 \text{ kN}$.

Από την διαφορετική μορφολογία ρηγματώσεως των δύο δοκών θα μπορούσαν να εξαχθούν συμπεράσματα και για τους κύριους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας που ενεργοποιούνται στην κάθε περίπτωση: Στην δοκό CB-1A, με $\alpha_s = 0.50$, είναι εμφανές ότι υπερισχύει ο μηχανισμός του διαγωνίου θλιπτήρα. Ενώ στην CB-1B, με $\alpha_s = 0.83$, λόγω του τρόπου ρηγματώσεως (χιαστί ρωγμές, απουσία σημαντικών διαγωνίων ρωγμών) φαίνεται να ενεργοποιείται περισσότερο ο μηχανισμός δικτυώματος. Την υπόθεση αυτή ενισχύει και η εμφάνιση αστοχίας συνάφειας κατά μήκος των διαμήκων οπλισμών του 1B που υποδηλώνει την μεγαλύτερη συνεισφορά των οπλισμών αυτών στην μεταφορά των δυνάμεων. Δεν διαθέτομε όμως λεπτομερέστερα αποδεικτικά στοιχεία για την παραπάνω διαφοροποίηση.

4.2 ΔΟΚΙΜΙΑ 2A, 2B (δισδιαγώνιοι οπλισμοί)

Κατά τους πρώτους κύκλους φορτίσεως η μορφολογία ρηγματώσεως των δοκιμών αυτών είναι ανάλογη με την αντίστοιχη των κλασικώς οπλισμένων δοκιμών (πρβλ. § 4.1). Στην δοκό 2A με $\alpha_s = 0.50$, εμφανίστηκαν ρωγμές κατά τη διεύθυνση των κυρίων διαγωνίων ενώ στην 2B, με $\alpha_s = 0.83$, πλέγμα χιαστί ρωγμών κοντά στα δύο άκρα (βλ. Φωτ. 10-13, 20-23).

Στη δοκό 2A παρατηρήθηκαν θλιπτικές αποφλοιώσεις στην επάνω αριστερή γωνία-της κατά τον κύκλο $n = 5$ (βλ. φωτ. 12), και στην κάτω αριστερή γωνία για $n = 7$ (φωτ. 14). Με την πρόοδο των ανακυκλίσεων, οι παραμορφώσεις συγκεντρώθηκαν στην αρχική ρωγμή κατά την κύρια διαγώνιο, οι δε αποφλοιώσεις στις γωνίες επεκτάθηκαν. Αστοχία επήλθε λόγω λυγισμού των διαγώνιων οπλισμών. Ο λυγισμός ξεκίνησε κατά τον κύκλο $n = 9$ με "πέταγμα" ενός τμήματος της επικαλύψεως κατά μήκος της διαγωνίου (βλ. φωτ. 16-18), ολοκληρώθηκε δε στον $n = 10$.

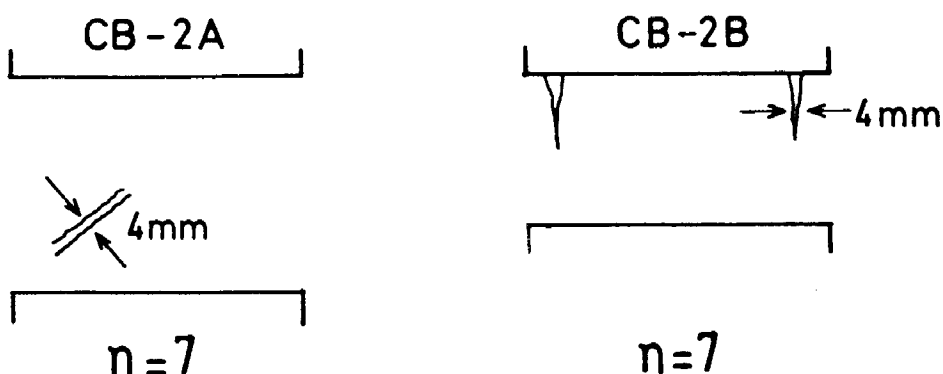
Στην φωτ. 19 φαίνεται καθαρά το "φούσκωμα" προς τα έξω

ενός τμήματος της δοκού λόγω του λυγισμού των διαγώνιων οπλισμών.

Κατακόρυφη ρωγμή ολισθήσεως εμφανίστηκε και στα δύο άκρα της δοκού, με πιο έντονη εκείνη στο αριστερό άκρο (φωτ. 14), το εύρος της οποίας έφτασε τα 5 mm κατά τον κύκλο $n = 7$. Η ρωγμή αυτή επέτεινε οπωσδήποτε την αποδιοργάνωση των γωνιών της δοκού στην παρειά αυτή.

Στη δοκό 2B εμφανίστηκε σύνθλιψη σκυροδέματος στην κάτω δεξιά γωνία κατά τον κύκλο $n = 4$ (φωτ. 22). Στον κύκλο $n = 7$ αποκολλήθηκε τμήμα της επικαλύψεως, στο τέλος δε του 9ου κύκλου συνέβη θλιπτική θραύση σκυροδέματος λόγω λυγισμού των διαγώνιων οπλισμών (φωτ. 24-27). Κατά τον λυγισμό των οπλισμών, αστόχησε λόγω συνθλίψεως και το άλλο άκρο της διαγωνίου (επάνω αριστερή γωνία: φωτ. 24).

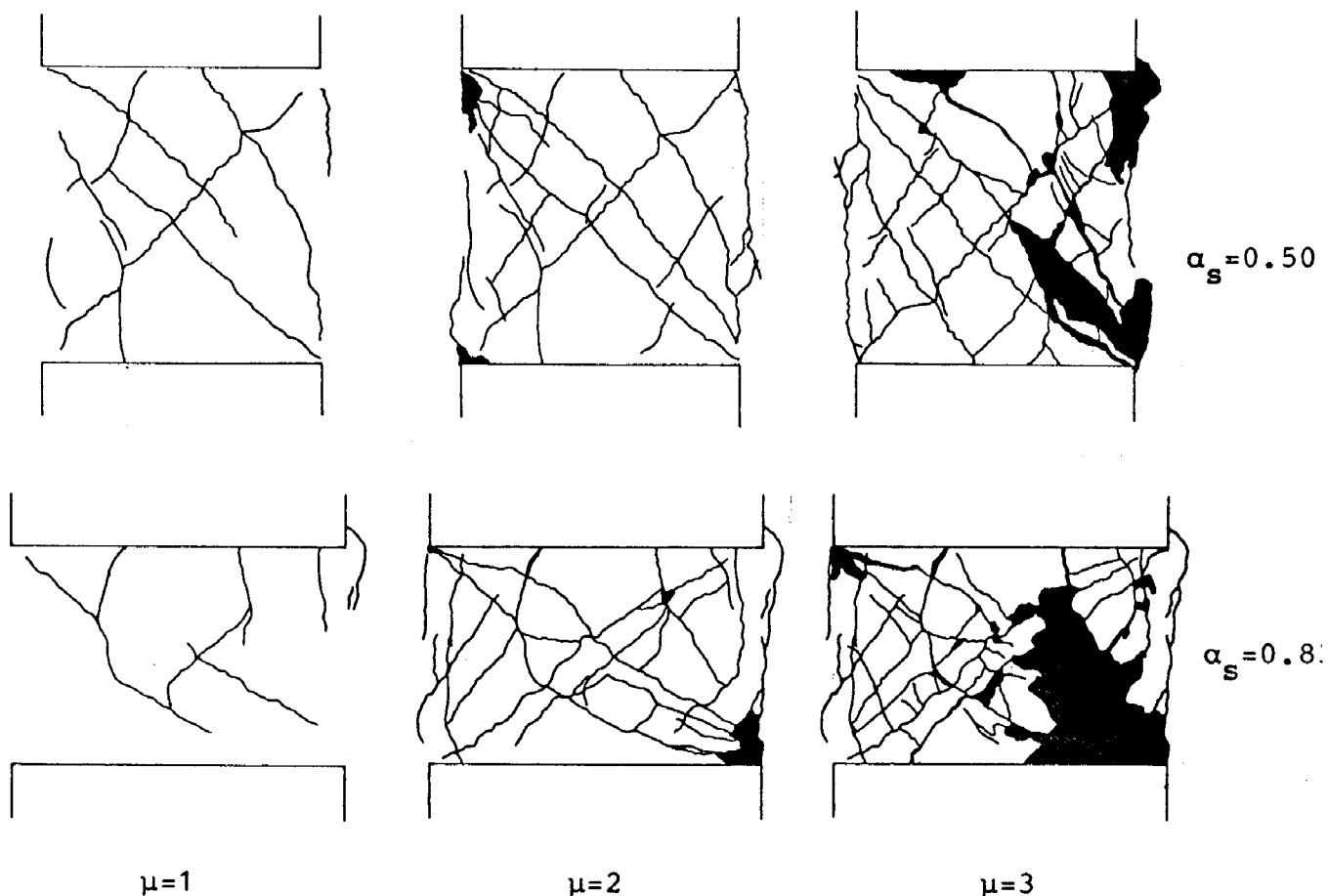
Στην δοκό αυτή οι παραμορφώσεις συγκεντρώθηκαν στις δύο καμπτικές ρωγμές που άνοιξαν στην επάνω παρειά (βλ. φωτ. 22), το άνοιγμα των οποίων έφτασε τα 4mm (για $n = 7$), κατ'αντίθεση προς τη δοκό 2A όπου οι παραμορφώσεις συγκεντρώθηκαν στις διαγώνιες ρωγμές (βλ. Σχ. 4.2).



Σχ. 4.2: Ρωγμές στις οποίες συγκεντρώθηκαν οι παραμορφώσεις στα δοκ. CB-2A, 2B.

Εμφανίστηκαν και κατακόρυφες ρωγμές μεταξύ δοκού και τοιχώματος (φωτ. 22), το εύρος-τους όμως παρέμεινε πολύ μικρό.

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι η παρουσία των δισδιαγώνιων οπλισμών μείωσε σημαντικά το εύρος της ρηγματώσεως των δοκών, συγκριτικά με την αντίστοιχη των κλασικώς οπλισμένων δοκών. Η βελτίωση στην συμπεριφορά είναι συγκριτικώς πολύ εντονότερη στις δοκούς με λόγο $\alpha_s = 0.50$. Έτσι λ.χ. στην φωτ. 2 (δοκ.



Σχ. 4.3: Μορφολογία ρηγματώσεως για τις 3 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων (δοκ. CB-2A,B).

1A, για $n = 4$) και φωτ. 13 (δοκ. 2A, για $n = 7$) παρατηρούμε "ίσες" ρηγματώσεις παρά την εξαιρετικώς πιο προχωρημένη εξαίτηση της δοκού 2A.

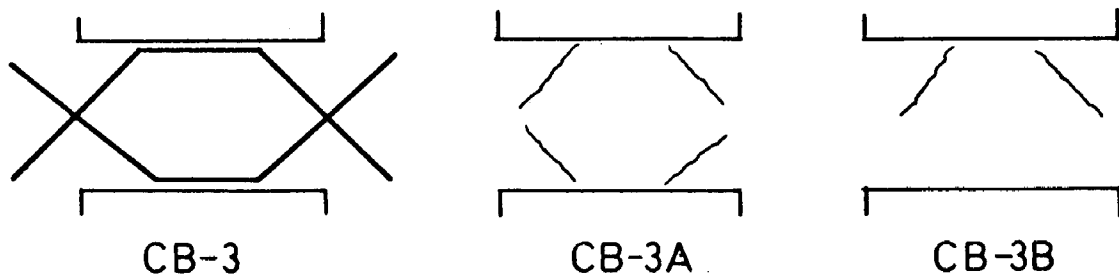
4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ 3A, 3B (χιαστί οπλισμός στα άκρα)

Σε χαμηλές στάθμες φορτίσεως ($n \leq 4$) η μορφολογία ρηγματώσεως είναι παρόμοια με των δοκών 1,2: ρωγμές κατά την κύρια διαγώνιο στο 3A, διαγώνιες ρωγμές κοντά στα άκρα στο 3B (φωτ. 28, 35, 36).

Για μεγαλύτερες στάθμες φορτίου όμως, και οι δύο δοκοί παρουσιάζουν στα άκρα -τους πλέγμα διαγωνίως διασταυρούμενων ρωγμών στις θέσεις ακριβώς όπου βρίσκονται οι χιαστί οπλισμοί (φωτ. 30,31,37,38). Οι ρωγμές αυτές υποδηλώνουν μάλλον, αστοχία

συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος κατά μήκος των χιαστί οπλισμών. Με την πάροδο των ανακυκλίσεων οι ρωγμές αυτές διευρύνονται (βλ. Σχ. 4.4) και επιταχύνουν την αστοχία των δοκιμών.

Παρατηρείται ότι το μεσαίο τμήμα των δοκών παραμένει σχετικώς, ανάπαφο (βλ. φωτ. 32,39,41).

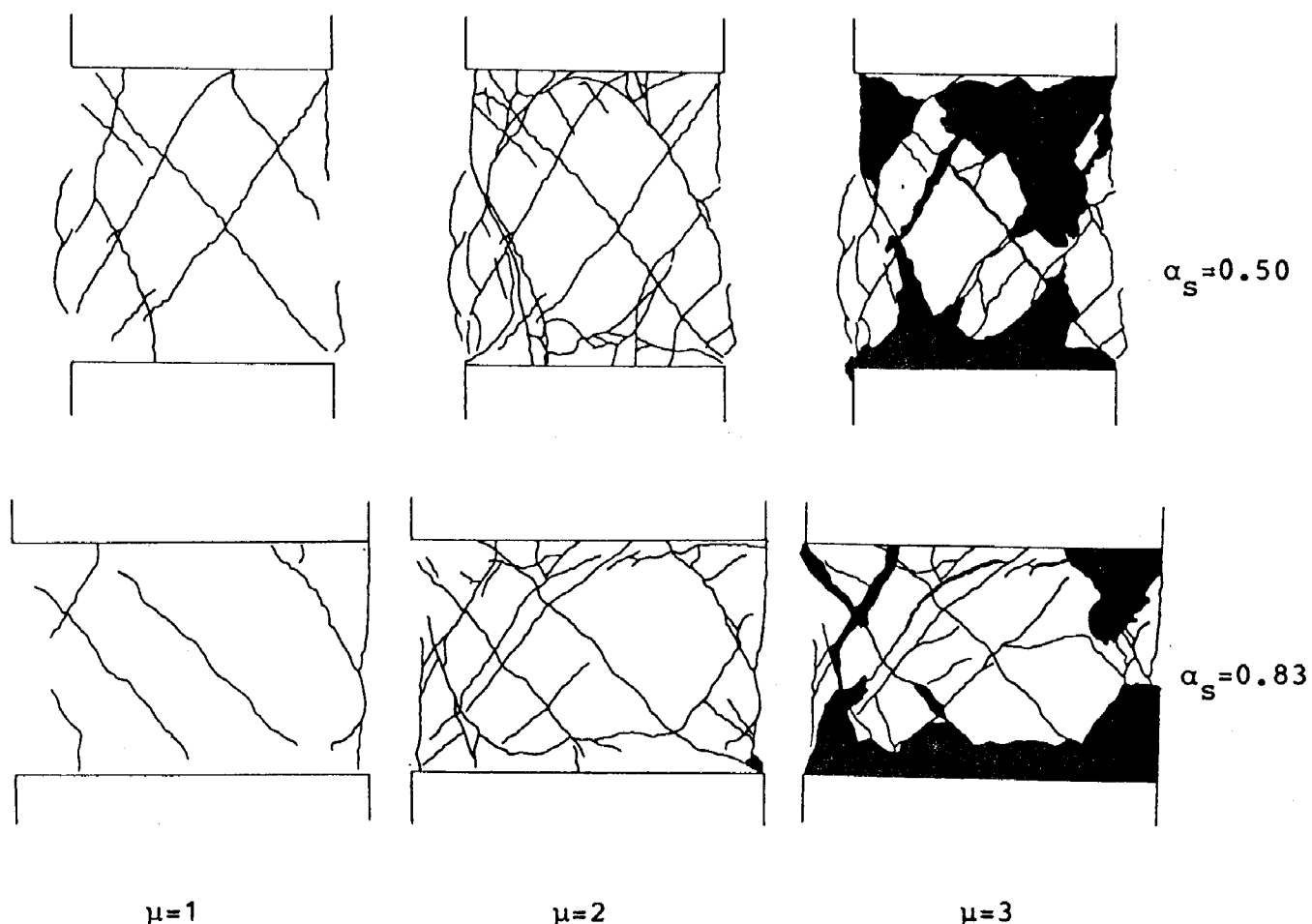


Σχ. 4.4: Ρωγμές στις οποίες συγκεντρώθηκαν οι παραμορφώσεις των δοκών με χιαστί οπλισμούς.

Καί οι δύο δοκοί αστόχησαν θλιπτοδιατμητικά στις γωνίες (βλ. φωτ. 32-34 και 39-41). Παρατηρήθηκε επίσης αστοχία συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος, κατά μήκος των ακραίων διαμήκων οπλισμών η οποία συνοδεύτηκε κι από έντονες αποφλοιώσεις και αποκόλληση της επικάλυψης (φωτ. 34,40,42).

Οι κατακόρυφες ρωγμές ολισθήσεως που εμφανίζονται στα άκρα των δοκών δεν διευρύνονται, πράγμα που αναμένεται λόγω της παρουσίας των χιαστί οπλισμών ακριβώς πάνω στις ακραίες διατομές.

Απ' την μορφολογία ρηγματώσεως παρατηρούμε ότι και οι χιαστί οπλισμοί, για μεσαίες τιμές μετακινήσεων ($n \leq 6,7$), οδήγησαν σε μικρότερου εύρους και εκτάσεως ρηγμάτωση απ' ότι ο κλασικός τρόπος οπλίσεως.



Σχ. 4.5: CB-3A,B - Μορφολογία ρηγματώσεως για τις 3 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

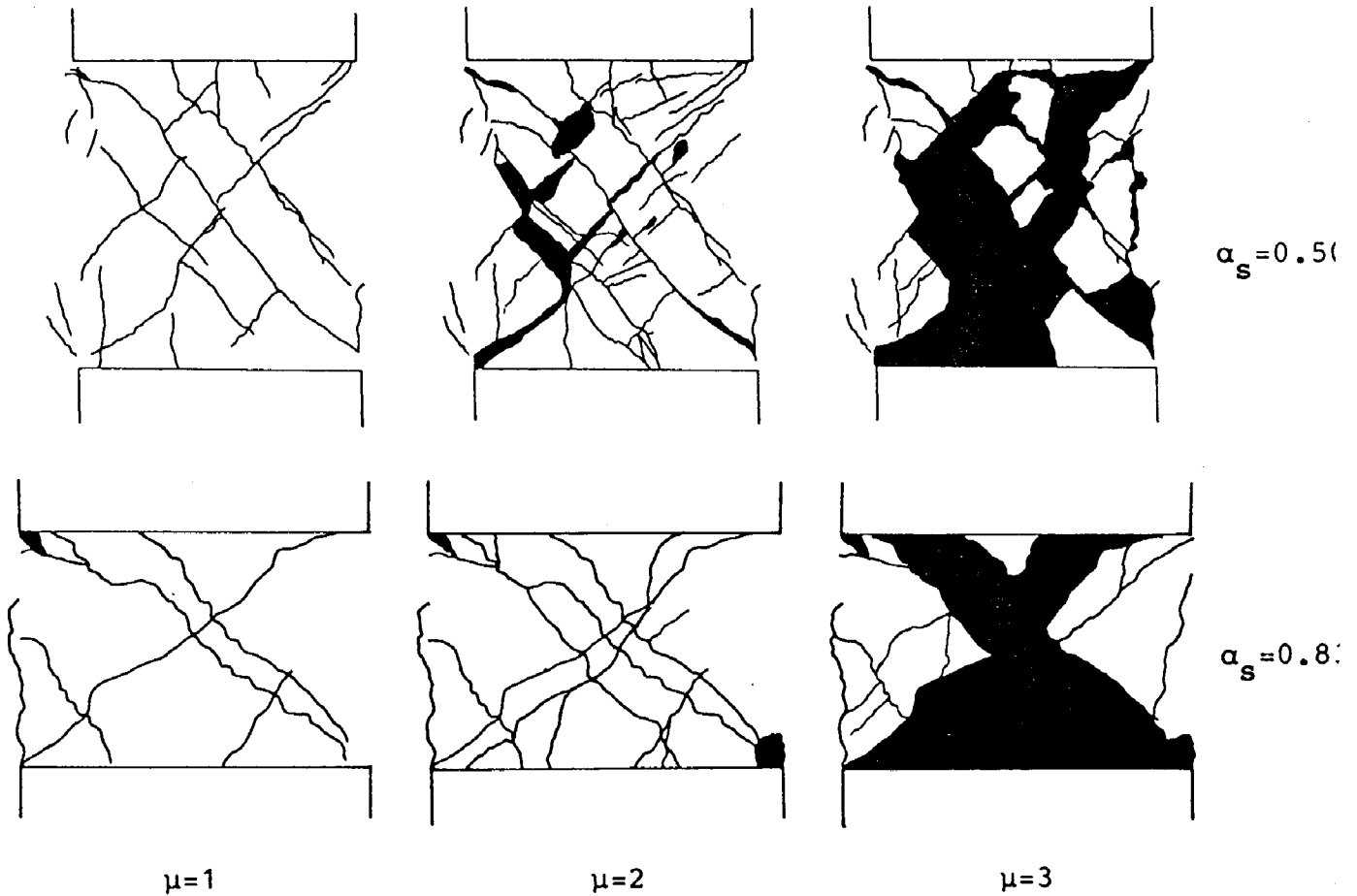
4.4 ΔΟΚΙΜΙΑ 4A, 4B (βλήτρα καθόλο το μήκος της δοκού)

Στις δοκούς αυτές δεν παρατηρείται η διαφοροποίηση μορφολογίας ρηγματώσεως ανάλογα με τον λόγο α_s . Και στα δύο δοκίμια, παρατηρούνται ρωγμές κατά τις κύριες διαγωνίους, το εύρος των οποίων αυξάνει με την αύξηση του πλήθους των ανακυκλίσεων (βλ. φωτ. 43-46, Σχ. 4.6).

Η αστοχία καί στα δύο δοκίμια επέρχεται στο μέσον της δοκού, λόγω συνδυασμού θλίψεως και διατμήσεως, συνοδεύεται δε από εκτεταμένες αποφλοιώσεις σκυροδέματος και αποκάλυψη των οπλισμών (πρβλ. φωτ. 47-50, Σχ. 4.6).

Εμφανίστηκε επίσης αστοχία συνάφειας μικρής εκτάσεως, κατά μήκος των ακραίων οπλισμών, για μεγάλες τιμές μετακινήσεων.

Κατακόρυφες ρωγμές στις θέσεις συνενώσεως με τα τοιχώματα πρακτικώς δεν εμφανίστηκαν. Ο ρόλος "πεδήσεως" των βλήτρων είναι φανερός.



Σχ. 4.6: Μορφολογία ρηγματώσεως δοκ. CB-4A,B για τις 3 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

Γι' αυτόν τον λόγο, διατηρήθηκαν σχεδόν ανέπαφα τα ακραία τμήματα των δοκών, όλες δε οι βλάβες συγκεντρώθηκαν στα μεσαία τμήματα.

Αυτός όμως ο τρόπος οπλίσεως δεν οδήγησε σε μειωμένη ρηγματώση συγκριτικά με εκείνη της κλασικής οπλίσεως.

4.5 ΔΟΚΙΜΙΑ 5A, 5B (βλήτρα στις θέσεις συνενώσεως με τα τοιχώματα).

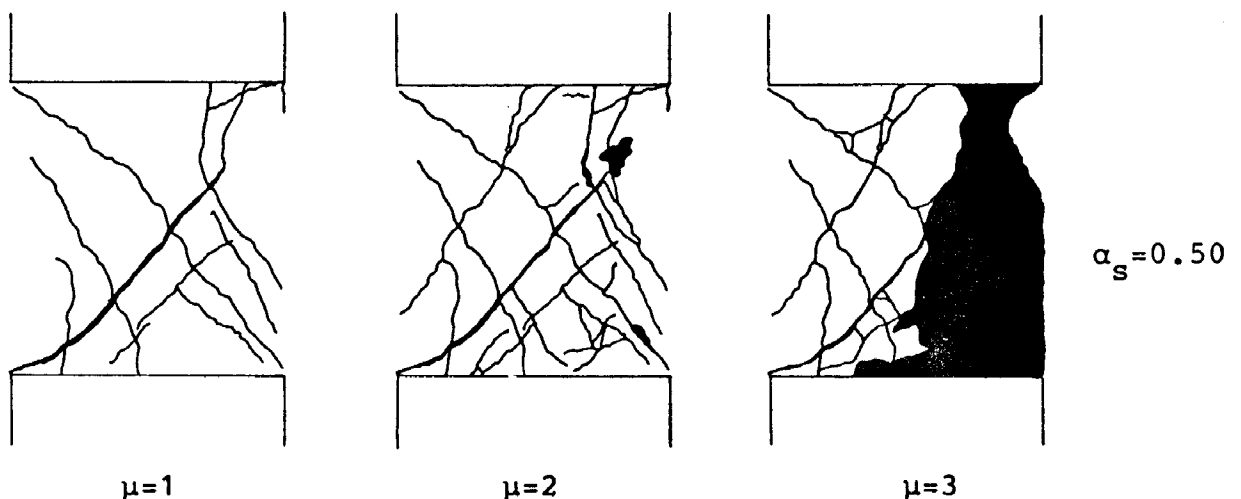
Οι δοκοί με "κοντά" βλήτρα συμπεριφέρθηκαν κατά τρόπον ανάλογο με τις δοκούς που είχαν βλήτρα σε όλο το μήκος-τους (πρβλ. §4.4).

Απ'τους πρώτους κύκλους φορτίσεως εμφανίζονται διαγώνιες ρωγμές κατά τη διεύθυνση των κύριων διαγωνίων, στις οποίες συγκεντρώνονται όλες οι παραμορφώσεις των δοκών (βλ. φωτ. 51,52, Σχ. 4.7). Με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων παρατηρείται σύνθλιψη και αποφλοιώση της κάτω δεξιάς γωνίας των δοκών (φωτ. 53), καθώς και τμημάτων των κυρίων διαγωνίων (φωτ. 54).

Η αστοχία των δοκών επέρχεται λόγω θλιπτοδιατμητικής θραύσεως του σκυροδέματος στο δεξιό άκρο. Η θραύση συνοδεύεται από εκτεταμένες αποφλοιώσεις και αποκάλυψη των οπλισμών, οι οποίες είναι εντονότερες στην όψη Β των δοκών λόγω μικρότερου πάχους επικάλυψης (φωτ. 55-58).

Αστοχία συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος παρατηρείται σε μικρή έκταση κατά μήκος των ακραίων διαμήκων οπλισμών.

Κατακόρυφες ρωγμές ολισθήσεως μεταξύ δοκού-τοιχώματος δεν εμφανίστηκαν.



Σχ. 4.7: Μορφολογία ρηγμ. δοκ. CB-5A για τις 3 στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

Ο τρόπος αστοχίας των δοκών αυτών οφείλεται μάλλον στη μεταφορά των δυνάμεων βλήτρου στο σκυρόδεμα, στη θέση όπου

σταματούν τα βλήτρα. Οι δυνάμεις αυτές, σε συνδυασμό με την θλίψη και διάτμηση που μεταφέρονται μέσω των θλιβόμενων διαγωνίων απ' το άλλο άκρο της δοκού, προκαλούν την αστοχία.

Η όπλιση αυτή δεν οδήγησε σε μειωμένη ρηγμάτωση συγκριτικά με την κλασική όπλιση.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται ενδεικτικά το είδος και ο βαθμός των βλαβών του κάθε δοκιμίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

(Για την κάθε μορφή σημειώνονται: + = ελαφρά, ++ = μέτρια, +++ = ισχυρή)

Λόγος διατμήσεως α_s	α/α δοκιμίου	Μορφολογικά στοιχεία						
		Διαγώνια ρηγμάτωση	Ολίσθηση άρων	Απόλεια συνάφειας	Θλιπτοδιατμη- τική θραύση άρων	Λοιπές (λυγισμός διαγ-ράβδ.)	Χιαστί ρωγμές στα άκρα	Αποφλοιώσεις
0.50	CB-1A	+++	++				+	
	CB-2A	+++	+		+++	+++	+	+
	CB-3A	+	+	+++	+		+++	+++
	CB-4A	+++		+	+			+++
	CB-5A	+++		++	+++			++
0.83	CB-1B	+	+	++	+		++	+++
	CB-2B	++	+		+++	+++	+	++
	CB-3B		+	+++	+		+++	++
	CB-4B	+++		+	+			+++
	CB-5B	+++		++	+++			++



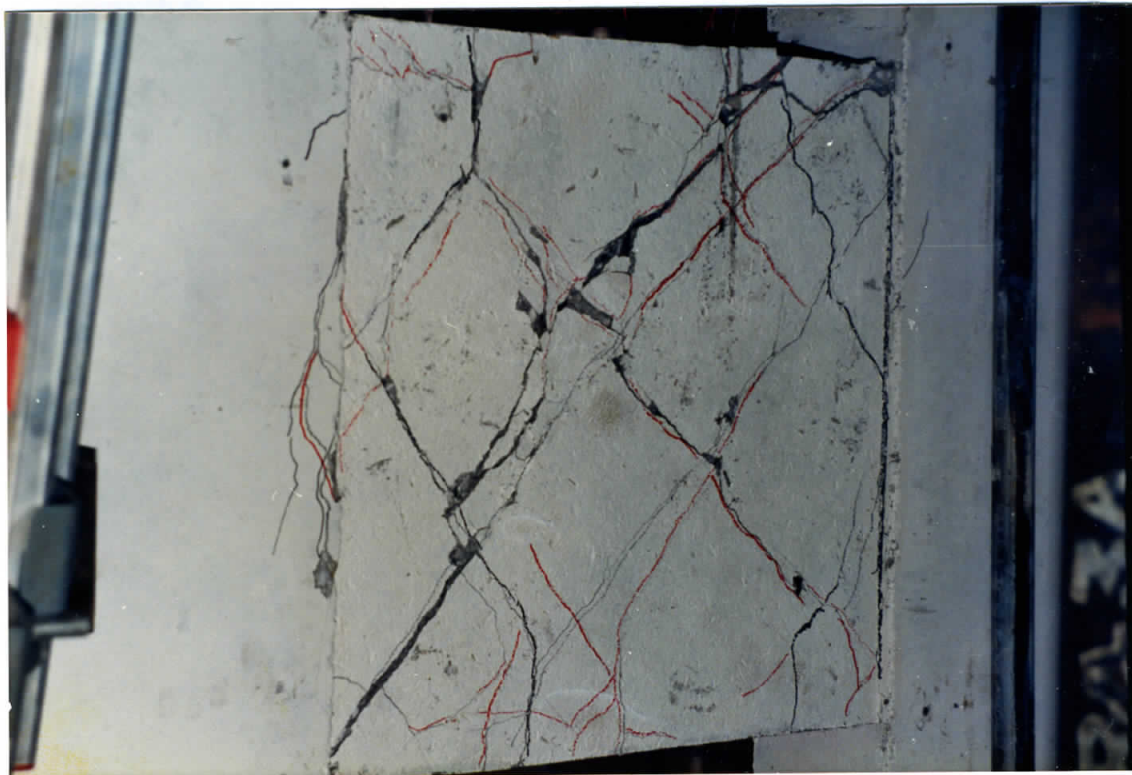
Φωτ. 1: CB-1A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το πέρας των 3 πρώτων κύκλων φορτίσεως: $\mu=1$ ($\delta=\pm 8.15\text{mm}$, $V_{\max}=183\text{ kN}$) - όψη Α.



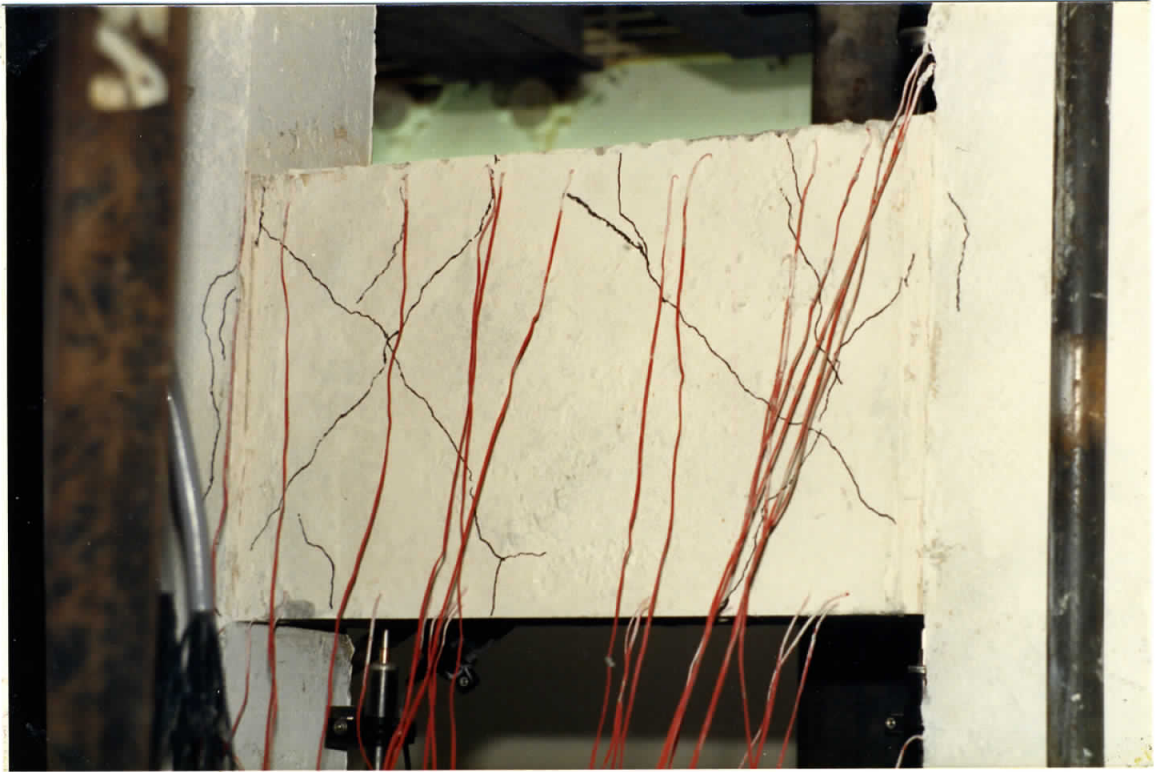
Φωτ. 2: CB-1A. Μορφολογία ρηγματώσεως για: $n=4^-$, $\mu=2$ ($\delta=-16.2\text{mm}$, $V=-196\text{ kN}$) - όψη Α.



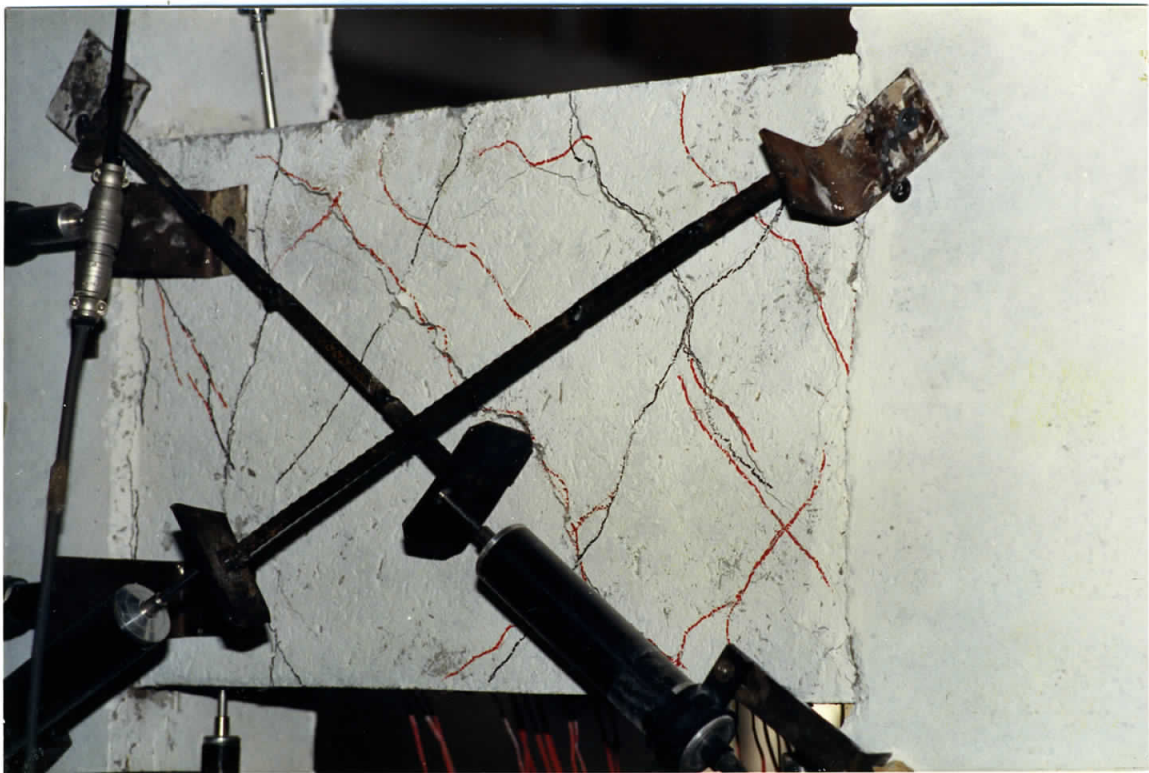
Φωτ. 3: CB-1A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία του δοκιμίου ($n = 7$) - όψη A -.



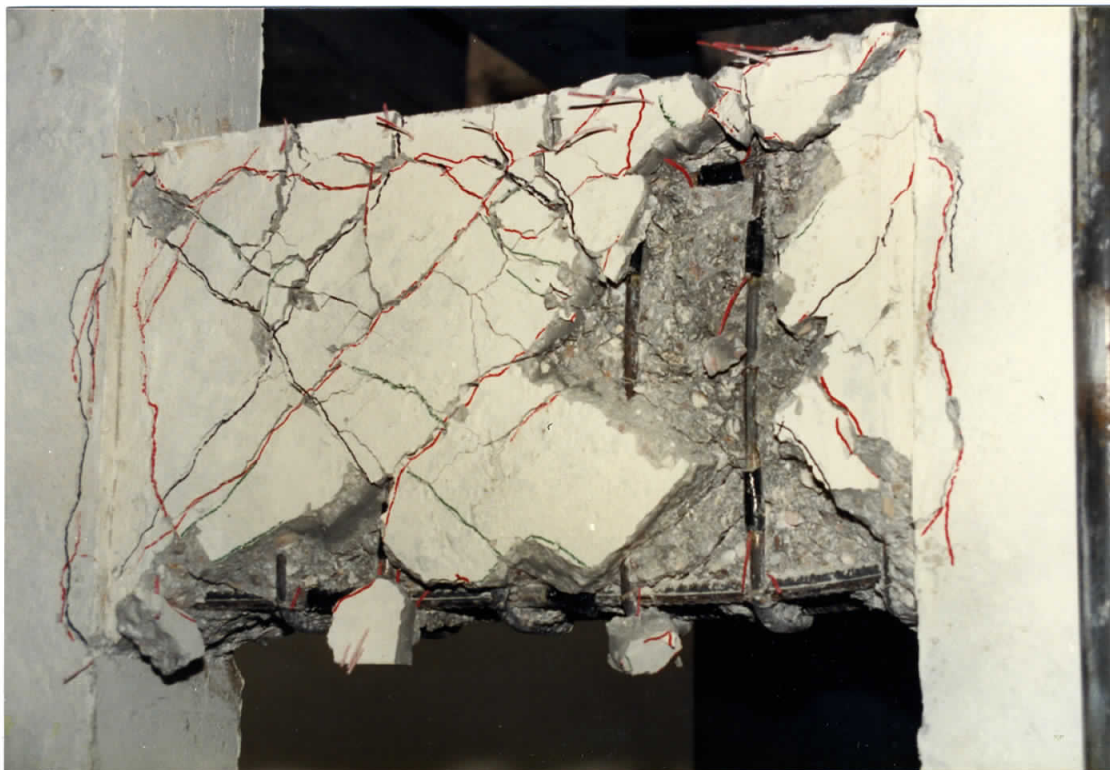
Φωτ. 4: CB-1A Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία του δοκιμίου - όψη B -.



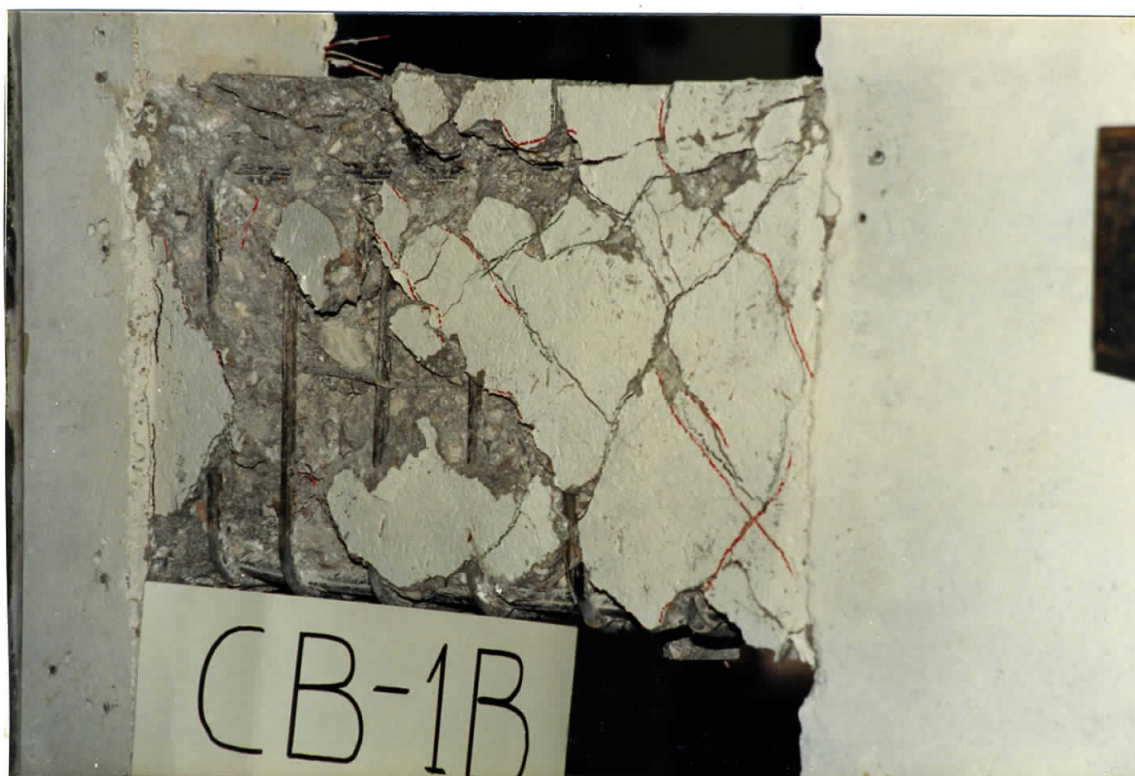
Φωτ. 5: CB-1B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το πέρας των 3 πρώτων κύκλων $\mu=1$ ($\delta = \pm 6,4\text{mm}$, $V_{\max} = 100\text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 6: CB-1B. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 6$, $\mu = 2$ ($\delta = \pm 12,8\text{ mm}$, $V_{\max} = 124\text{ kN}$) - όψη Β -.



Φωτ. 7: CB-1B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία του δοκιμίου $n = 10$, $\mu > 3$ ($\delta_{10} = 49\text{mm}$, $V_{\max} = 108 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 8: CB-1B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία - όψη Β -.



Φωτ. 9: CB-1B. Λεπτομέρεια μορφολογίας ρηγματώσεως κατά την αστοχία - όψη Β -.



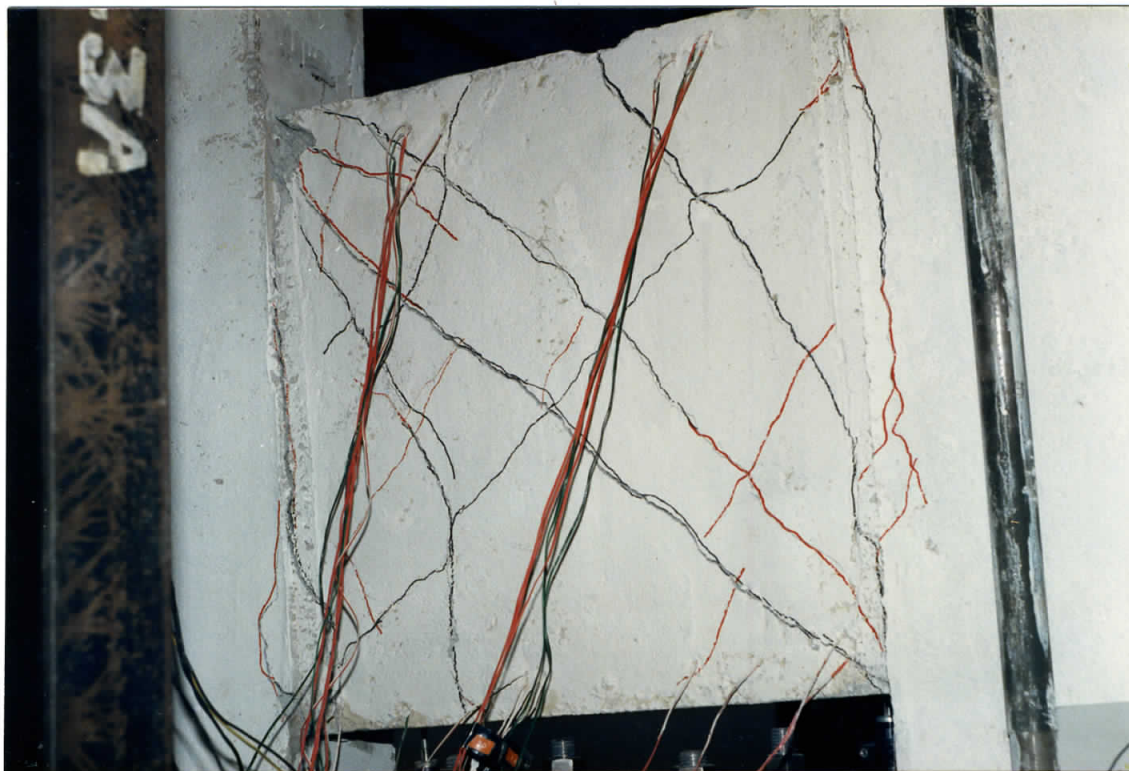
Φωτ.10: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 1^+$ ($\delta = 6,2 \text{ mm}$, $V = 188 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 11: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το πέρας των 3 πρώτων κύκλων $\mu = 1$ ($\delta = \pm 7,4\text{mm}$, $V_{\max} = 214 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 12: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το τέλος των 6 πρώτων κύκλων $\mu = 2$ ($\delta = \pm 14,8\text{mm}$, $V_{\max} = 283 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 13: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 7+$ ($\delta = 17,3 \text{ mm}$, $\uparrow V = 252,5 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 14: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 8+$, $\mu = 3$ ($\delta = 22,4 \text{ mm}$, $\uparrow V = 227 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 15: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 10+$ ($\delta_{\text{παραμ.}} = -9,5 \text{ mm}$, $\uparrow V = 12 \text{ kN}$) - όψη A -.



Φωτ. 16: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία του δοκιμίου ($n = 10$) - όψη A -.



Εντ. 17: CB-2A. Λεπτομέρεια θλιπτοδιατμητικής αστοχίας της γωνίας της δοκού.



Φωτ. 18: CB-2A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία - όψη Β -.



Φωτ. 19: CB-2A. Λεπτομέρεια όψεως Β όπου διακρίνεται το "φούσκωμα" της δοκού λόγω λυγισμού των διαγωνίων οπλισμών.



Φωτ. 20: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 3 πρώτους κύκλους φορτίσεως: $\mu = 1$ ($\delta = \pm 8,5 \text{ mm}$, $V_{\max} = 115 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 21: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 3 πρώτους κύκλους - όψη Β -.



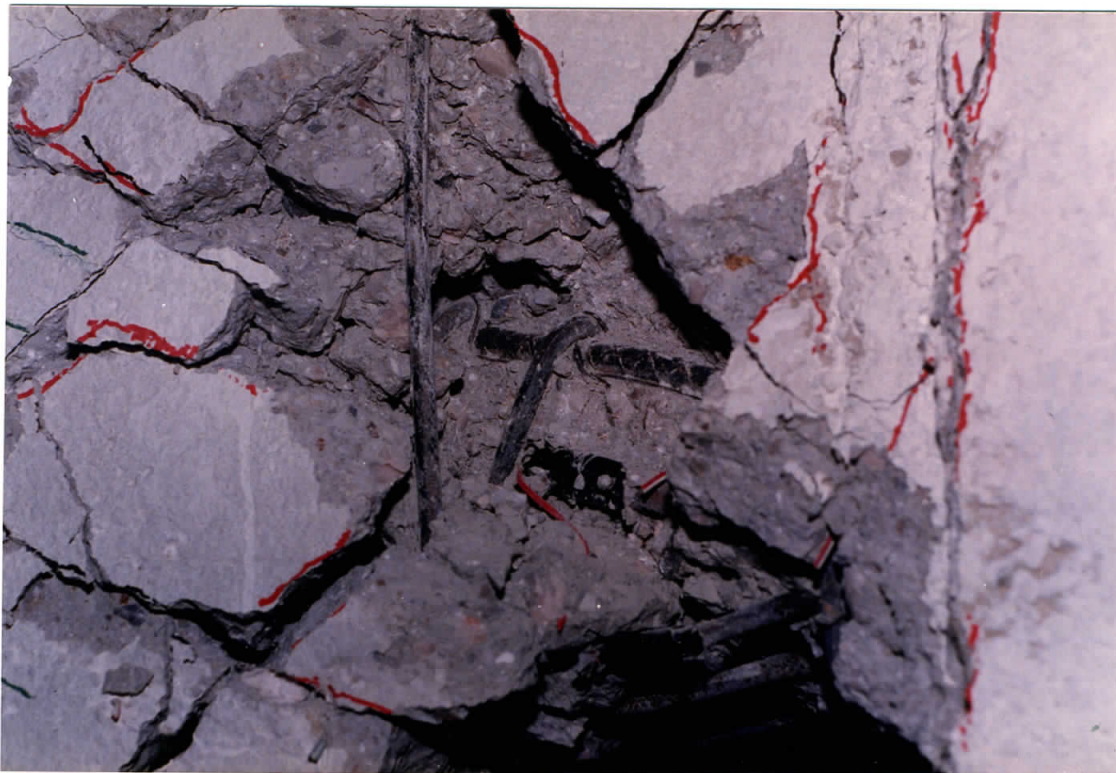
Φωτ. 22: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το τέλος των 6 πρώτων κύκλων: $\mu = 2$ ($\delta = \pm 17 \text{ mm}$, $V_{\max} = 167 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 23: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 6 πρώτους κύκλους - όψη Β -.



Φωτ. 24: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία ($n = 10$, $\delta_{10} = 43 \text{ mm}$) - όψη Α -.



Φωτ. 25: CB-2B. Λεπτομέρεια φωτ. 24. Διακρίνεται ο λυγισμός των διαγωνίων ράβδων.



Φωτ. 26: CB-2B. Μορφολογία ρηγματώσεως κατά την αστοχία της δοκού - όψη Β -.



Φωτ. 27: CB-2B. Λεπτομέρεια αστοχίας της γωνίας της δοκού.



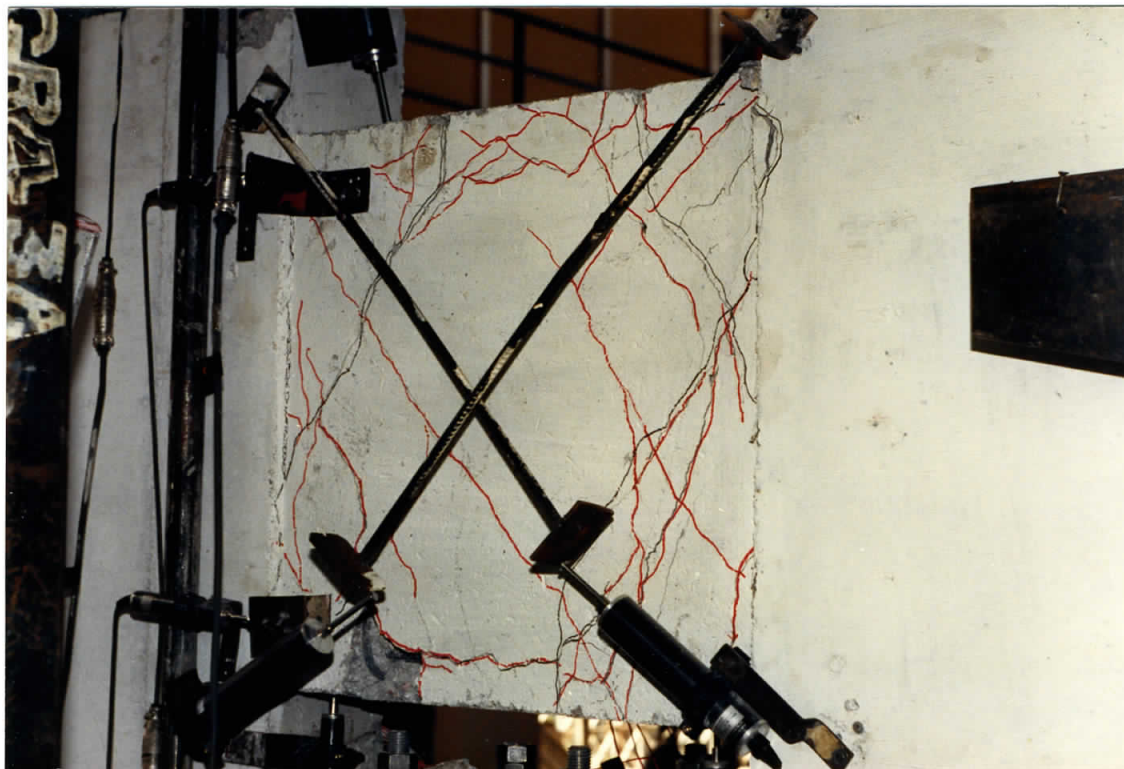
Φωτ. 28: CB-3A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το τέλος της πρώτης δοκιμής (προφόρτιση). Δεν μεταβλήθηκε μετά το τέλος των 3 πρώτων κύκλων της κανονικής δοκιμής: $\mu = 1$
($\delta = \pm 8,6 \text{ mm}$, $V_{\max} = 183 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 29: CB-3A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 5\pm$ ($\delta = 10,2$ mm, $\uparrow V = 150$ kN) - όψη Α -.



Φωτ. 30: CB-3A. Τέλος 6ου κύκλου: $\mu = 2$ ($\delta = \pm 17,2$ mm, $V_{\max} = 302$ kN) - όψη Α -.



Φωτ. 31: CB-3A. Τέλος του κύκλου - όψη Β -.



Φωτ. 32: CB-3A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία ($n = 9$, $\delta_9 = 34,8 \text{ mm}$) - όψη Α -.

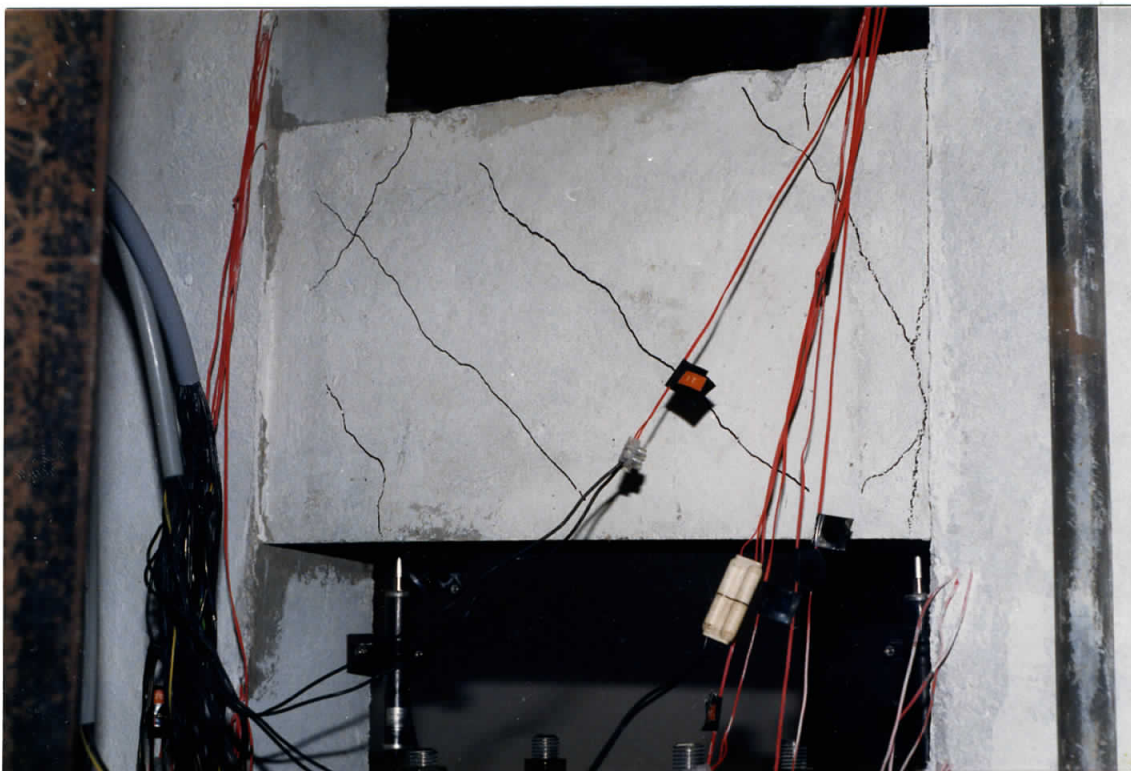


Φωτ. 33: CB-3A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία - όψη Β -.

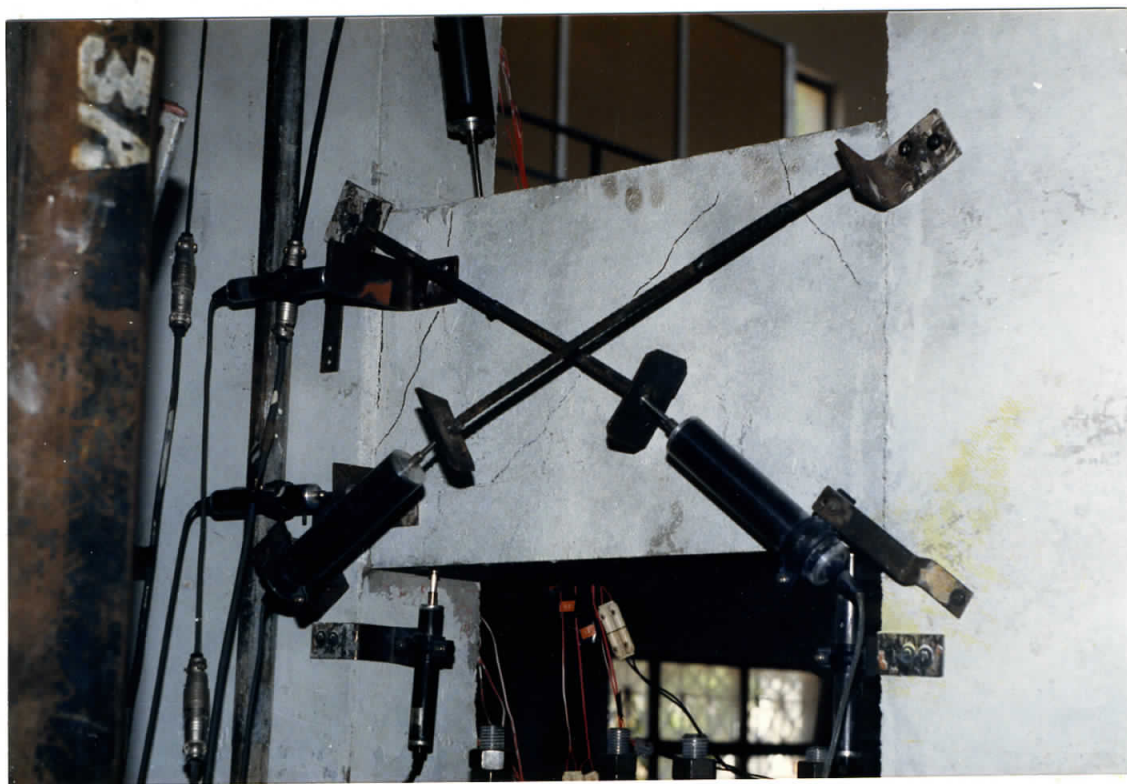


Φωτ. 34:

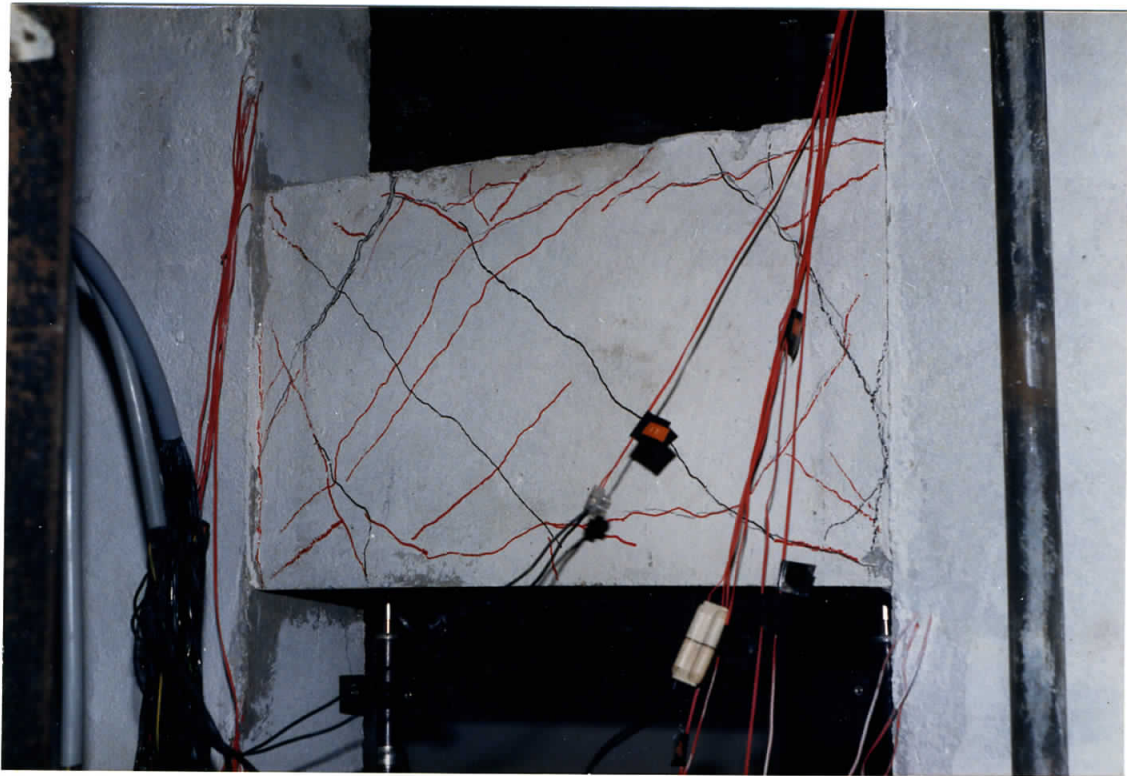
CB-3A. Λεπτομέρεια ρηγματώσεως
παρειάς της δοκού μετά
την αστοχία - όψη Β -.



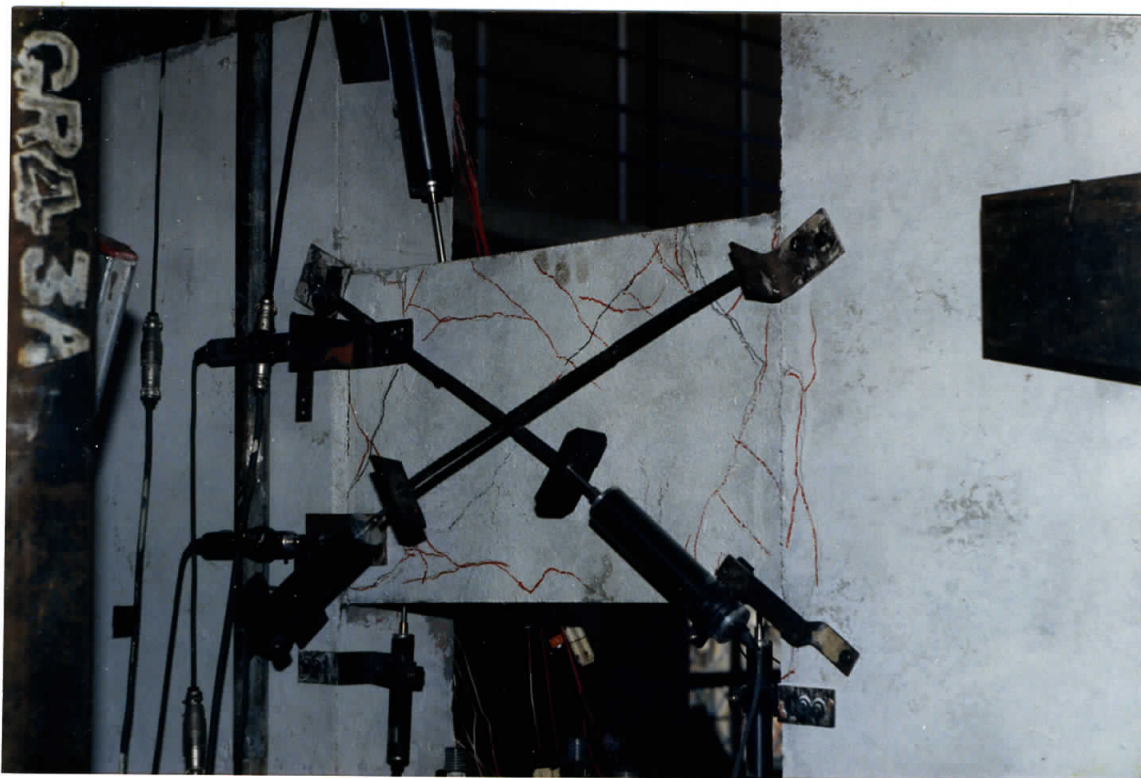
Φωτ. 35: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 3 πρώτους κύκλους: $\mu = 1$ ($\delta = \pm 6,4 \text{ mm}$, $V_{\max} = 120 \text{ kN}$) - όψη Α -.



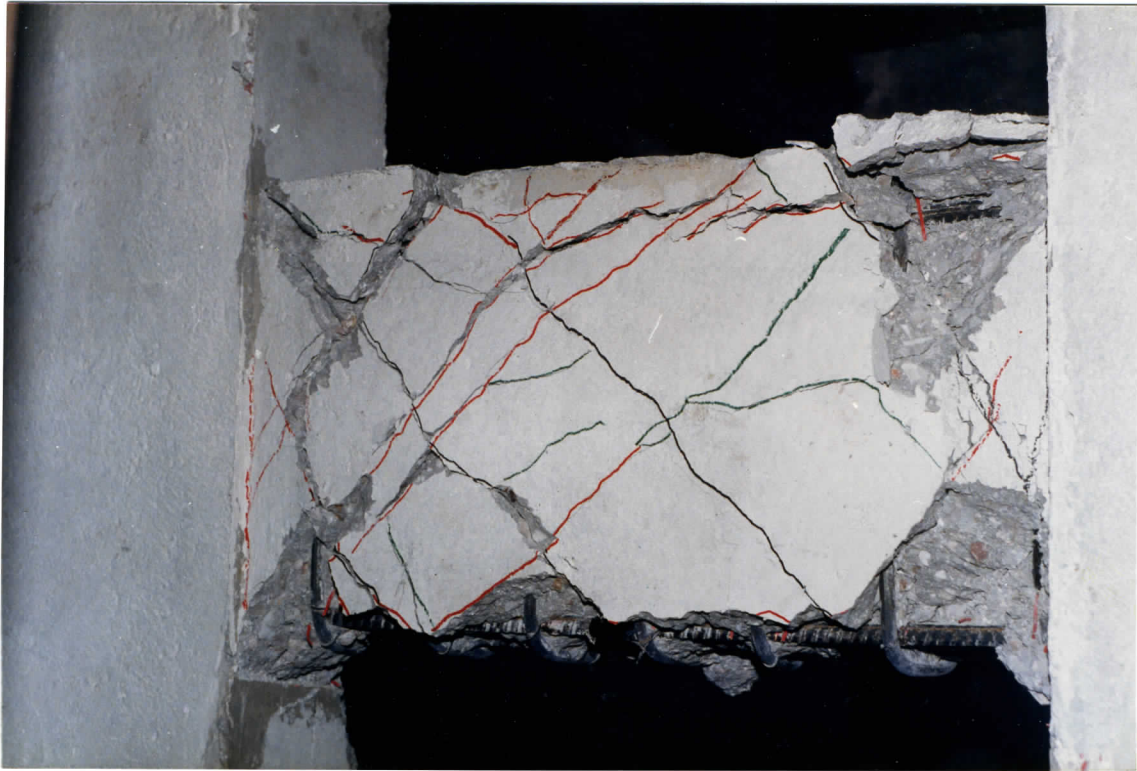
Φωτ. 36: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 3 πρώτους κύκλους - όψη Β -.



Φωτ. 37: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά το τέλος του 6ου κύκλου: $\mu = 2$ ($\delta = \pm 12,8 \text{ mm}$, $V_{\max} = 151 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 38: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τον 6ο κύκλο - όψη Β -.



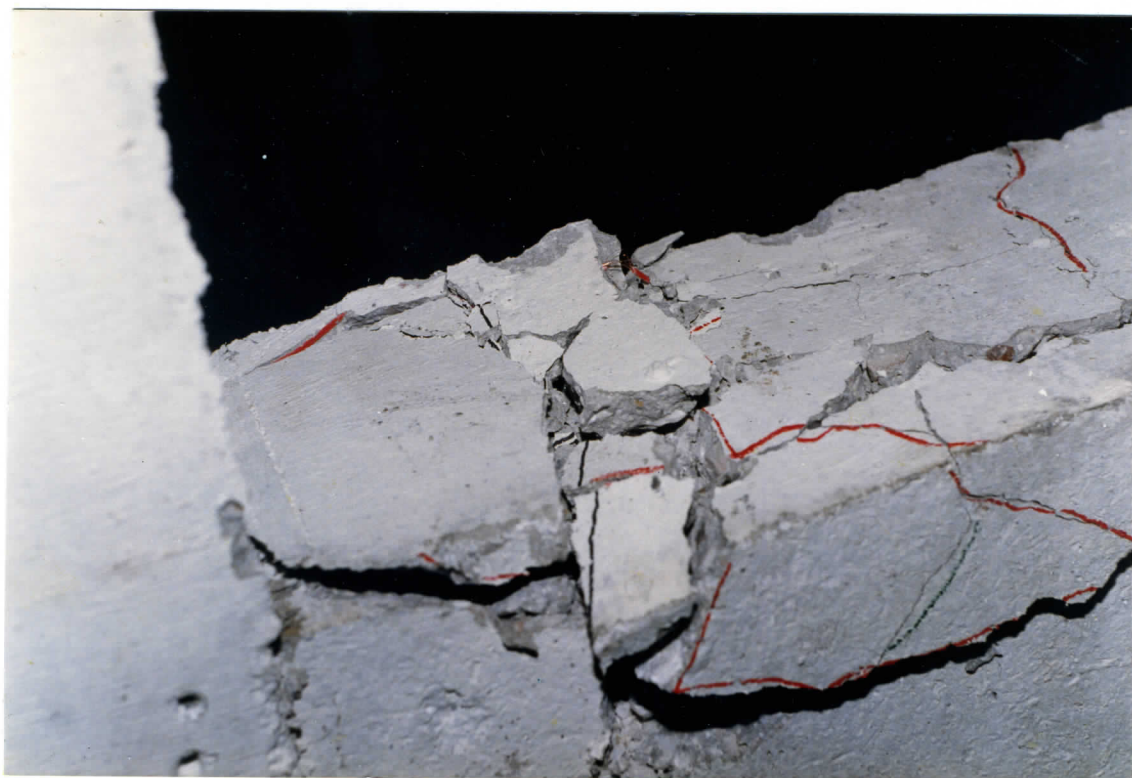
Φωτ. 39: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία της δοκού ($n = 10$, $\delta_{10} = 39,5 \text{ mm}$) - όψη Α -.



Φωτ. 40: CB-3B. Λεπτομέρεια αποκαλύψεως οπλισμών κάτω άκρου. Διακρίνονται οι χιαστί οπλισμοί.



Φωτ. 41: CB-3B. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία - όψη Β -



Φωτ. 42: CB-3B. Λεπτομέρεια θραύσεως επάνω γωνίας της δοκού.



Φωτ. 43: CB-4A. Μορφολογία ρηγματώσεως κατά την αποφόρτιση απ' τον κύκλο $n = 1+ -$ όψη A -.



Φωτ. 44: CB-4A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τους 3 πρώτους κύκλους: $\mu = 1$ ($\delta = \pm 10,4 \text{ mm}$, $V_{\max} = 282 \text{ kN}$) - όψη A -.



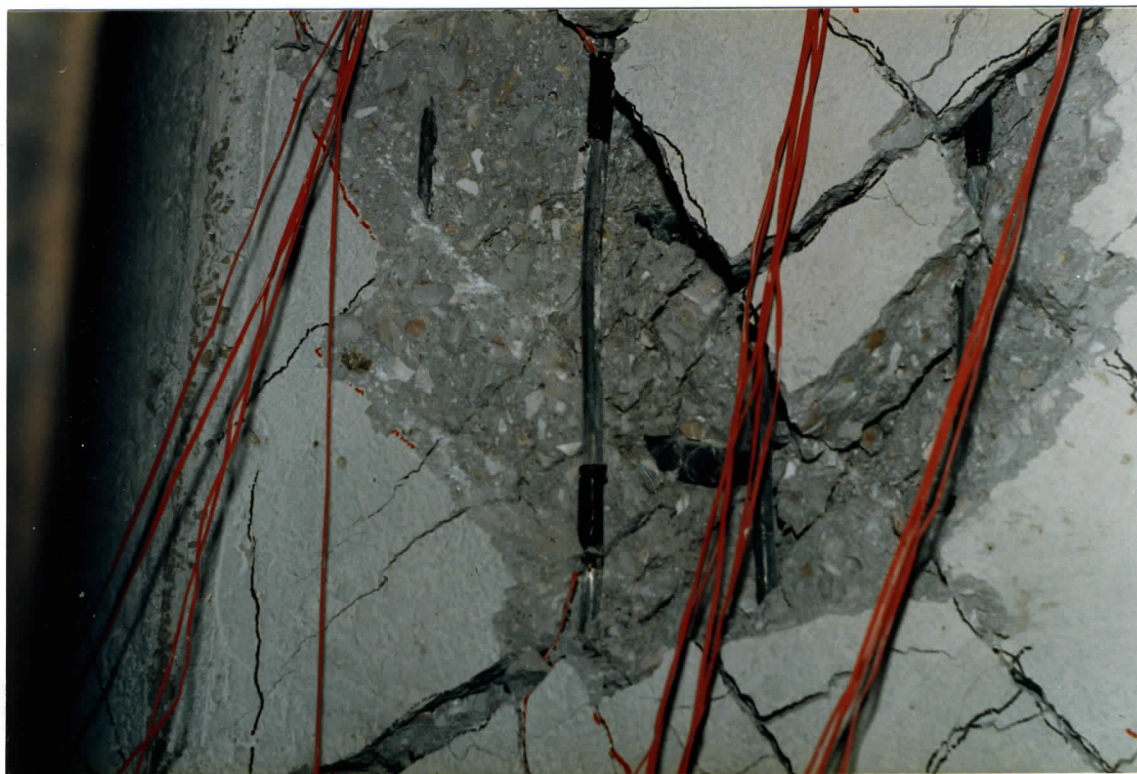
Φωτ. 45: CB-4A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά τον κύκλο: $n = 4+$.
 Η διαγώνια ρωγμή έχει $\delta_{\text{παρ}} = 5 \text{ mm}$ - όψη Α -.



Φωτ. 46: CB-4A. Μορφολογία ρηγματώσεως στο μέγιστο φορτίο του κύκλου: $n = 4-$ ($\delta = -16 \text{ mm}$, $\downarrow V = -110 \text{ kN}$) - όψη Α -.



Φωτ. 47: CB-4A. Κύκλος $n = 5$ - ($\delta = -10$ mm, $\downarrow V = -27$ kN) - όψη Α -.



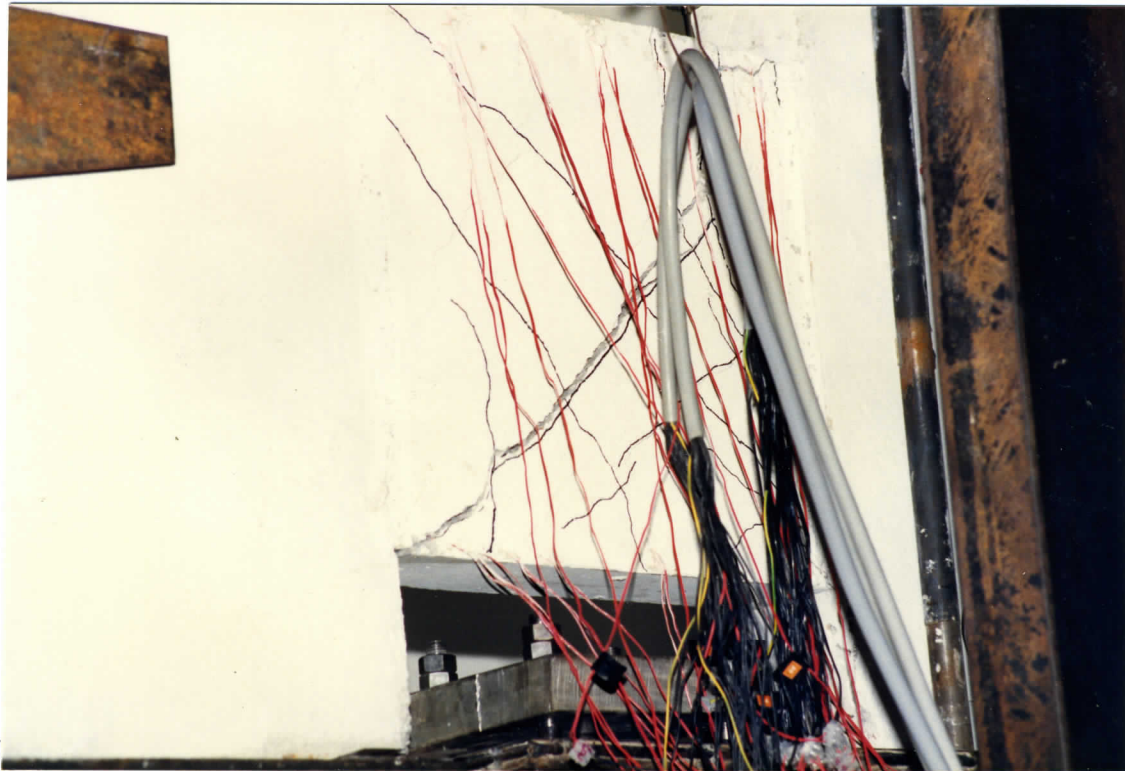
Φωτ. 48: CB-4A. Λεπτομέρεια θλιπτοδιατμητικής αστοχίας στο μέσον της δοκού.



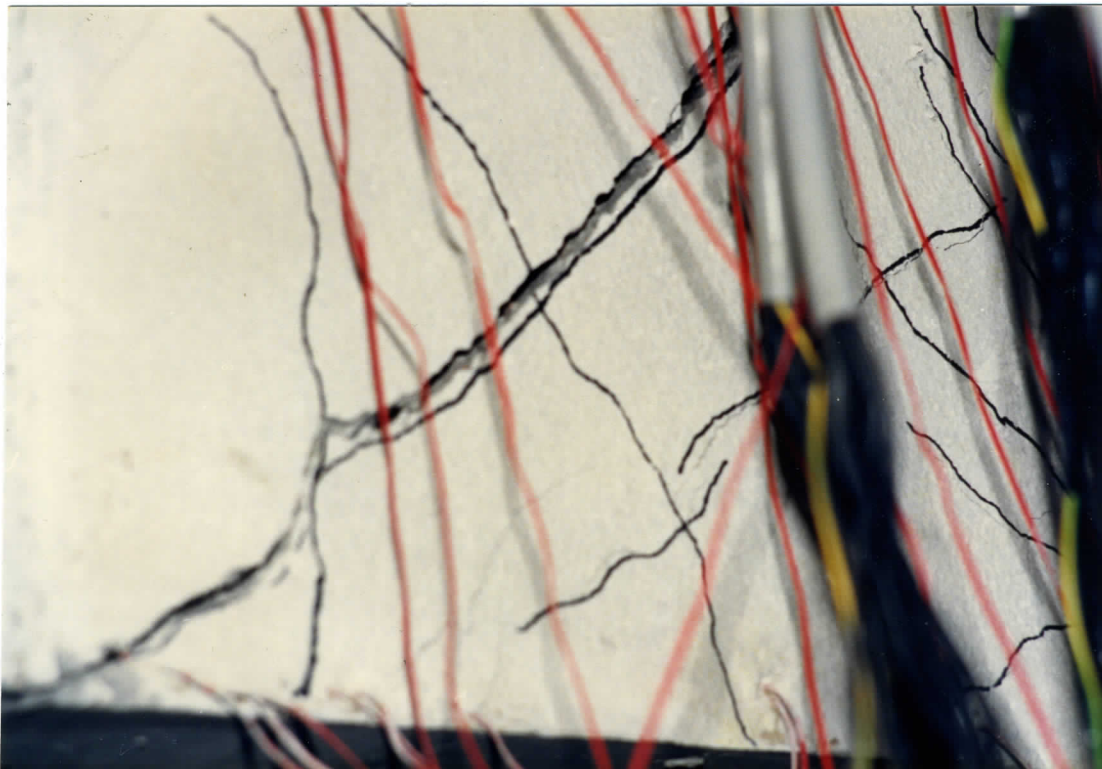
Φωτ. 49: CB-4A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία.
($n = 7$, $\delta_7 = 40,4 \text{ mm}$) - όψη Α -.



Φωτ. 50: CB-4A. Αστοχία δοκού - όψη Β - Διακρίνεται η εγκάρσια
διόγκωση στο μέσον.



Φωτ. 51: CB-5A. Μορφολογία ρηγματώσεως σε στάθμη φορτίσεως:
 $\downarrow V \approx -201 \text{ kN}$, $\delta = -11,8 \text{ mm}$ (κορυφή κύκλου $n = 2-$)
 - όψη Α -.



Φωτ. 52: CB-5A. Λεπτομέρεια φωτ. 51. Άνοιγμα διαγώνιας ρωγμής:
 $d = 10 \text{ mm}$.



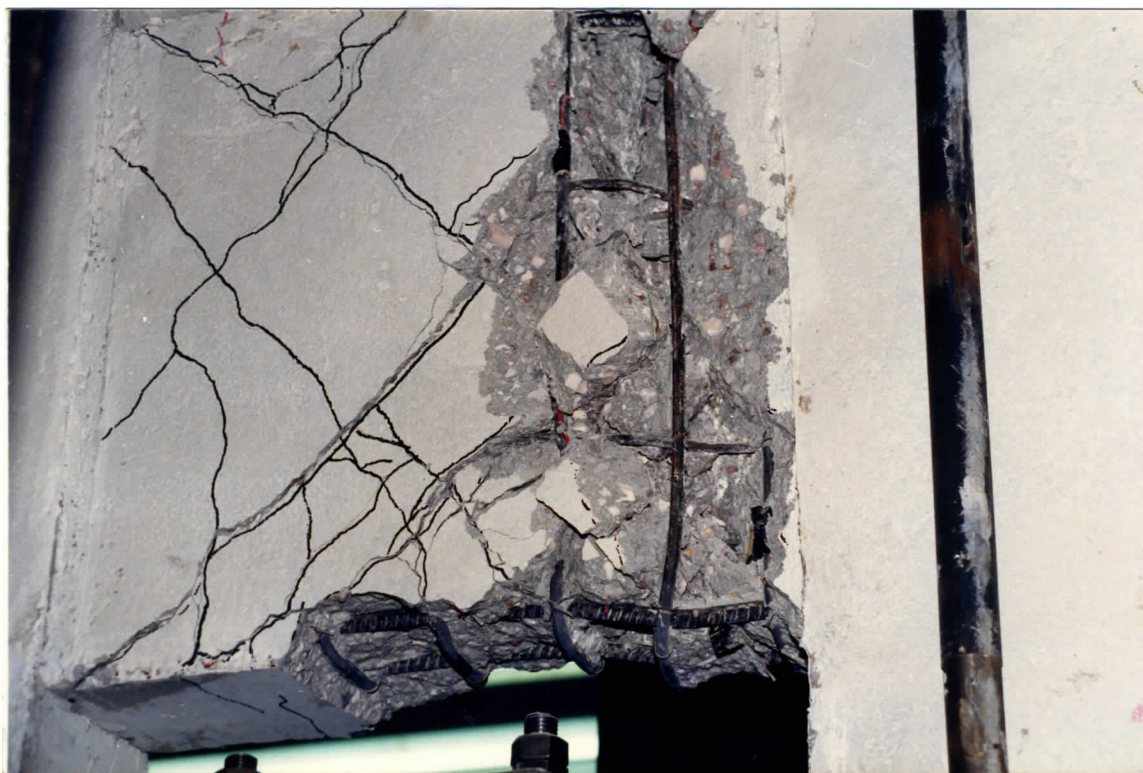
Φωτ. 53: CB-5A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 4-$: ($\delta = -12,1$ mm, $\downarrow V = -159$ kN) - όψη Α -.



Φωτ. 54: CB-5A. Μορφολογία ρηγματώσεως για $n = 4-$, - όψη Β -.



Φωτ. 55: CB-5A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία της δοκού - όψη Α -.



Φωτ. 56: CB-5A. Λεπτομέρεια αστοχίας κάτω γωνίας της δοκού. Διακρίνεται η παραμόρφωση των οπλισμών κάμψης $\phi 12$.



Φωτ. 57: CB-5A. Μορφολογία ρηγματώσεως μετά την αστοχία - όψη Β -. Διακρίνεται η στρέβλωση των συνδετήρων λόγω εγκάρσιας διογκώσεως.



Φωτ. 58: CB-5A. Λεπτομέρεια αστοχίας της κάτω γωνίας της δοκού.

5. ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΣ ΛΟΓΩ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΕΩΝ

Η μείωση της μέσης αποκρίσεως των δοκιμών για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως συναρτήσει του αριθμού "n" των κύκλων φαίνεται στα Σχ. 5.1 έως 5.5. Εκφράζεται με τον λόγο του μέσου φορτίου \bar{V}_n που αναλαμβάνει το δοκίμιο σε έναν κύκλο (για δεδομένη στάθμη επιβαλλόμενης μετακινήσεως) προς το μέσο φορτίο \bar{V}_1 που αντιστοιχεί στον 1ο κύκλο της ίδιας στάθμης μετακινήσεως (ίδιο "μ"). Στους Πίνακες 5.1, 5.2 σημειώνονται οι μέγιστες τιμές των φορτίων των δοκιμών στις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως ($V(+)$, $V(-)$), οι μέσες τιμές-τους \bar{V}_n , καθώς και οι αντίστοιχοι λόγοι \bar{V}_n/\bar{V}_1 .

Στα Σχ. 5.1-5.5 η καμπύλη $\mu = 1$ αντιστοιχεί στην μετακίνηση διαρροής $\delta = \delta y$, η $\mu = 2$ σε $\delta = 2\delta y$ και η $\mu = 3$ σε $\delta = 3\delta y$. Τα δοκίμια για τα οποία δεν δίδονται καμπύλες $\mu = 2$ ή 3 είχαν αστοχήσει για μικρότερες επιβαλλόμενες μετακινήσεις.

Στα Σχ. 5.6, 5.7 παριστάνεται η μέση μείωση της αποκρίσεως $\Delta\bar{V}$ (για τις στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων $\mu = 2, 3$) ως ποσοστό του \bar{V}_1 (της αντίστοιχης στάθμης "μ"), συναρτήσει του αριθμού n των κύκλων.

Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια CB-2A,B με την δισδιαγώνια όπλιση παρουσίασαν την μικρότερη μείωση αποκρίσεως από όλες τις άλλες κατηγορίες.

Μετά τις διαγωνίως οπλισμένες δοκούς, η μικρότερη μείωση αποκρίσεως ΔV παρατηρήθηκε στις δοκούς CB-3A,B με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα.

Η δοκός CB-3A για $\mu = 3$ παρουσίασε μεγάλη ΔV , ήταν όμως η μόνη απ' τις δοκούς με λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$ που άντεξε σε τόσο μεγάλες μετακινήσεις.

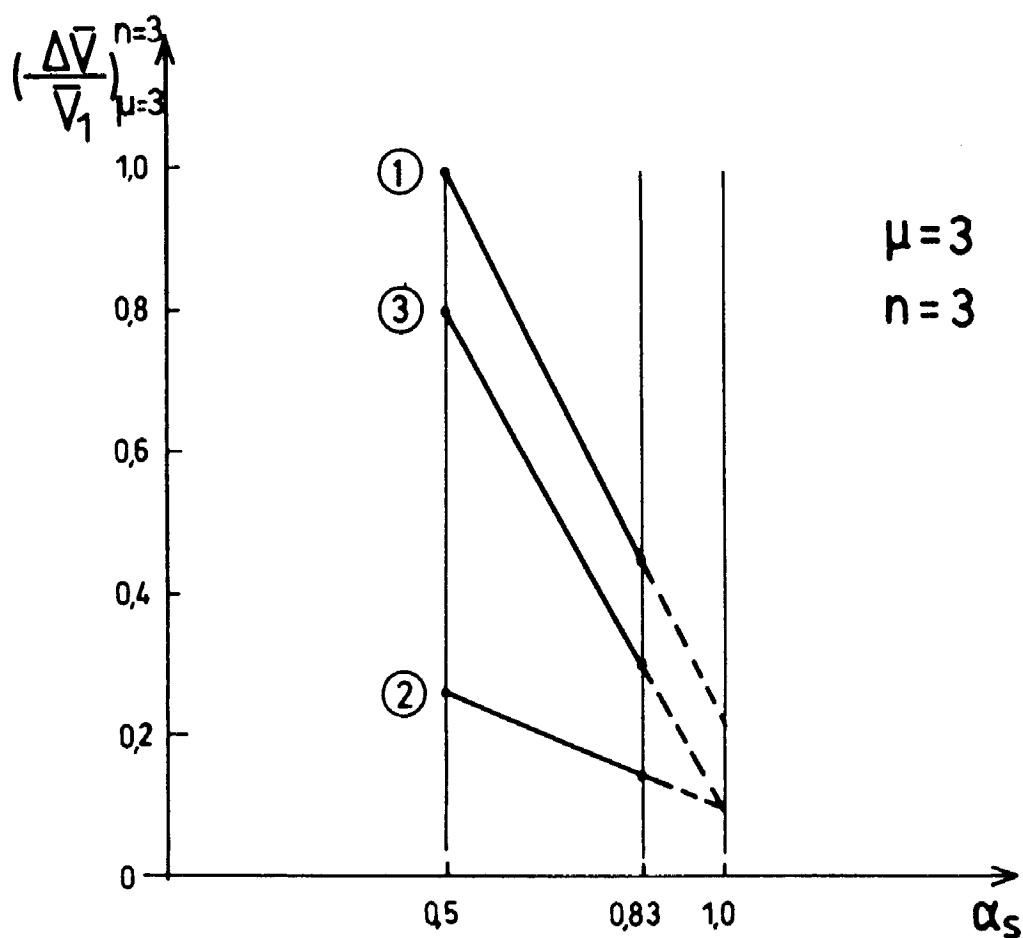
Τη χειρότερη συμπεριφορά, είχαν τα δοκίμια CB-4, CB-5 με τα βλήτρα (Σχ. 5.4-5.6).

Παρατηρείται ακόμη ότι τα δοκίμια CB-1B και CB-3B με $\alpha_s = 0.83$ παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά, σε αντίθεση με

τα CB-1A και CB-3A που είχαν $\alpha_s = 0.50$ (βλ. Σχ. 5.1, 5.3, 5.6). Βλέπουμε δηλαδή ότι για τον μεγαλύτερο λόγο διατμήσεως η διαφορά ανάμεσα στην κλασική όπλιση και στους χιαστί οπλισμούς στα άκρα μειώνεται (πρβλ. §4.2,8).

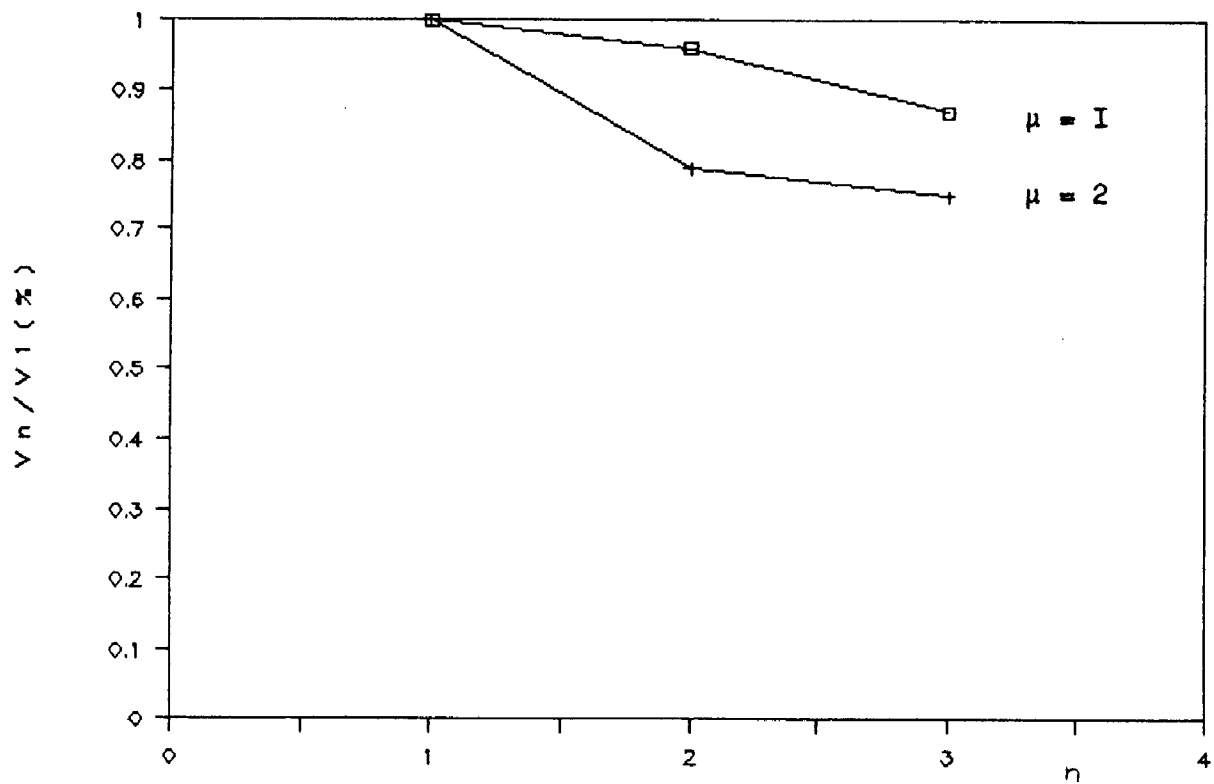
Συγκρίνοντας την συμπεριφορά των δοκών με την ίδια όπλιση και με διαφορετικό λόγο διατμήσεως, φαίνεται ότι οι δοκοί με $\alpha_s = 0.83$ (δοκμία Β) εμφάνισαν πολύ μικρότερη μείωση αποκρίσεως απ' τις δοκούς με $\alpha_s = 0.50$. Η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς γίνεται εντονότερη για μεγαλύτερες στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

Στο Σχ. 5.8 παριστάνεται ενδεικτικά η μείωση της αποκρίσεως των δοκών CB-1,2,3 συναρτήσει του λόγου διατμήσεως, για $\mu = 3$ και $n = 3$.

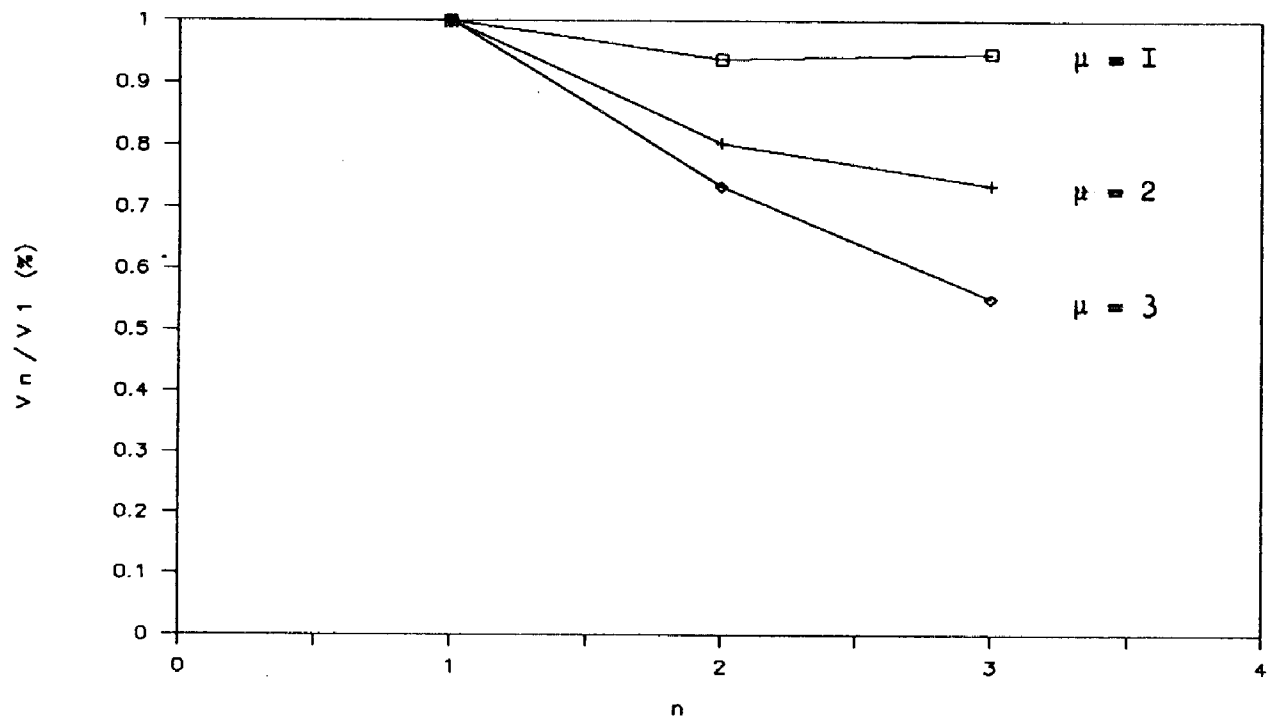


Σχ. 5.8: Μείωση της αποκρίσεως των δοκιμών CB-1,2,3 συναρτήσει του λόγου διατμήσεως (για $\mu = 3$, $n = 3$).

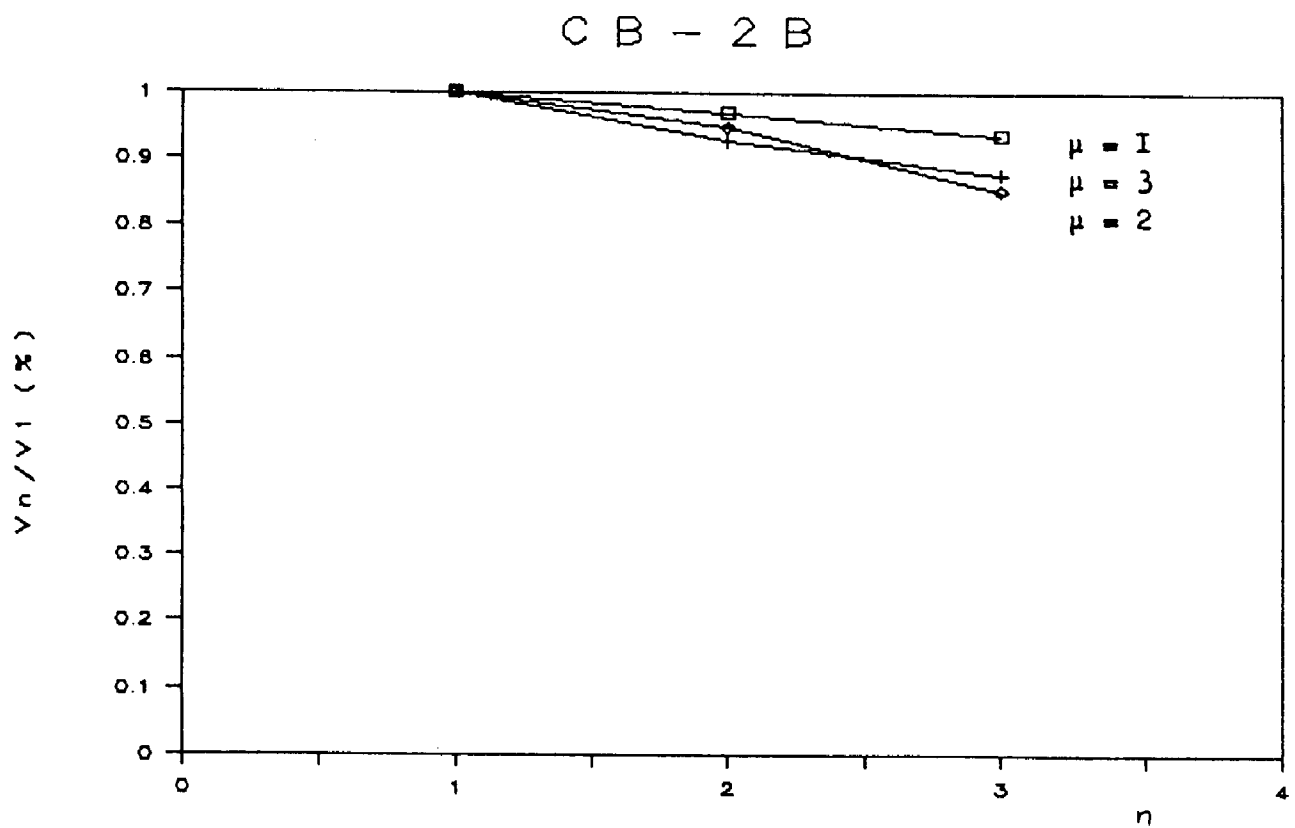
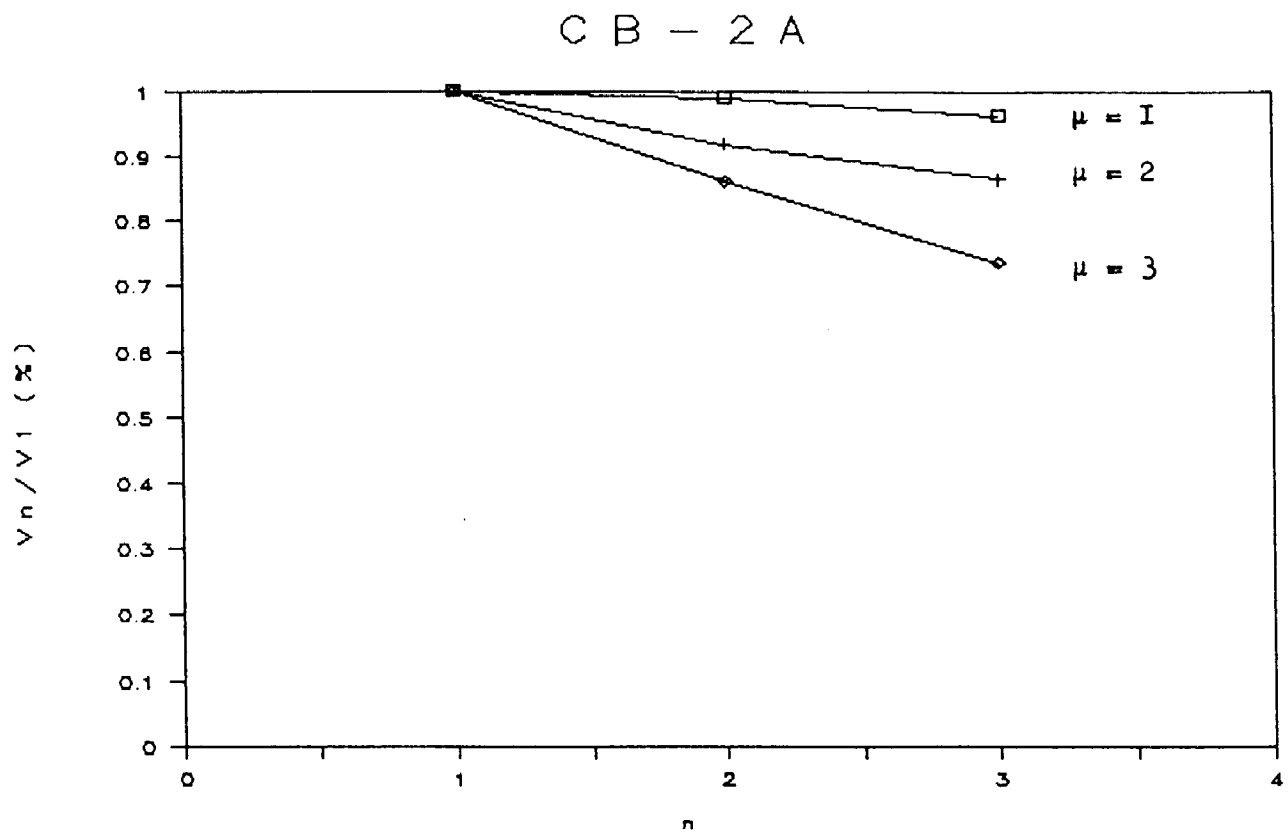
CB - 1 A



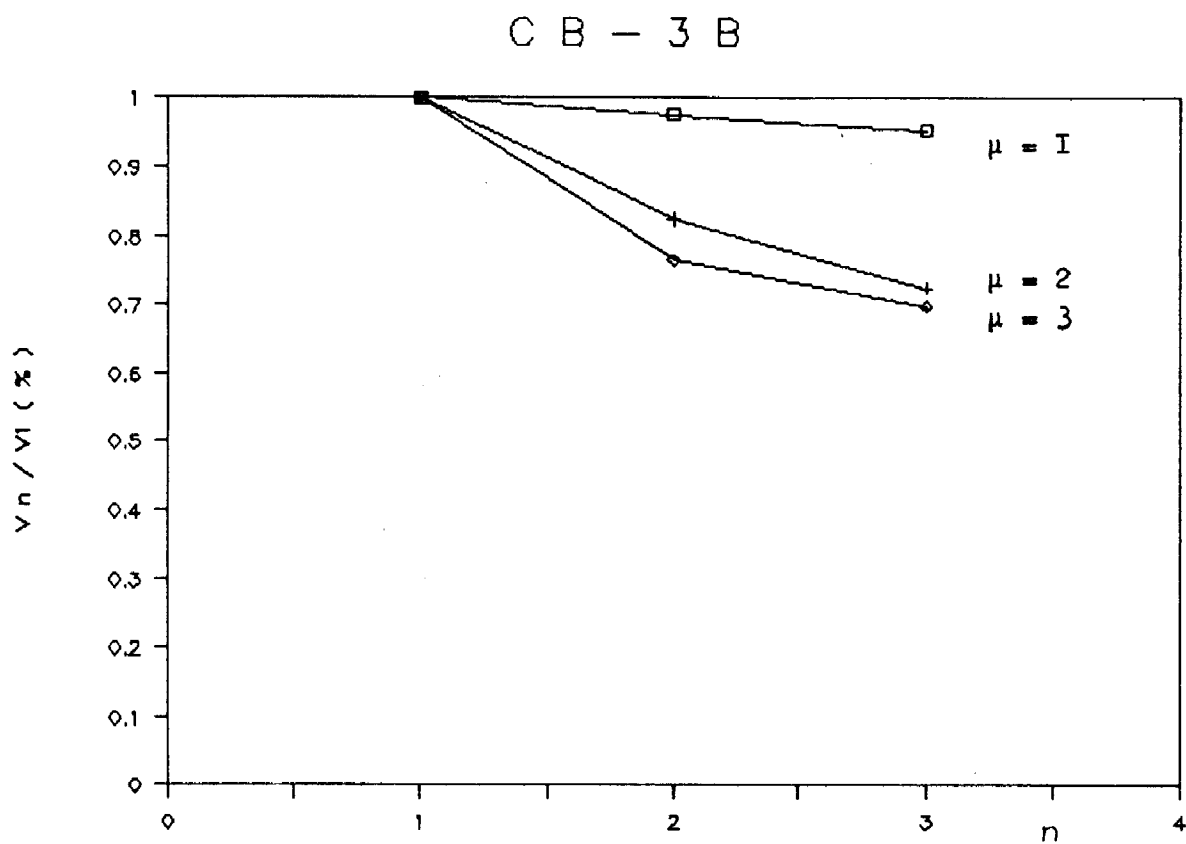
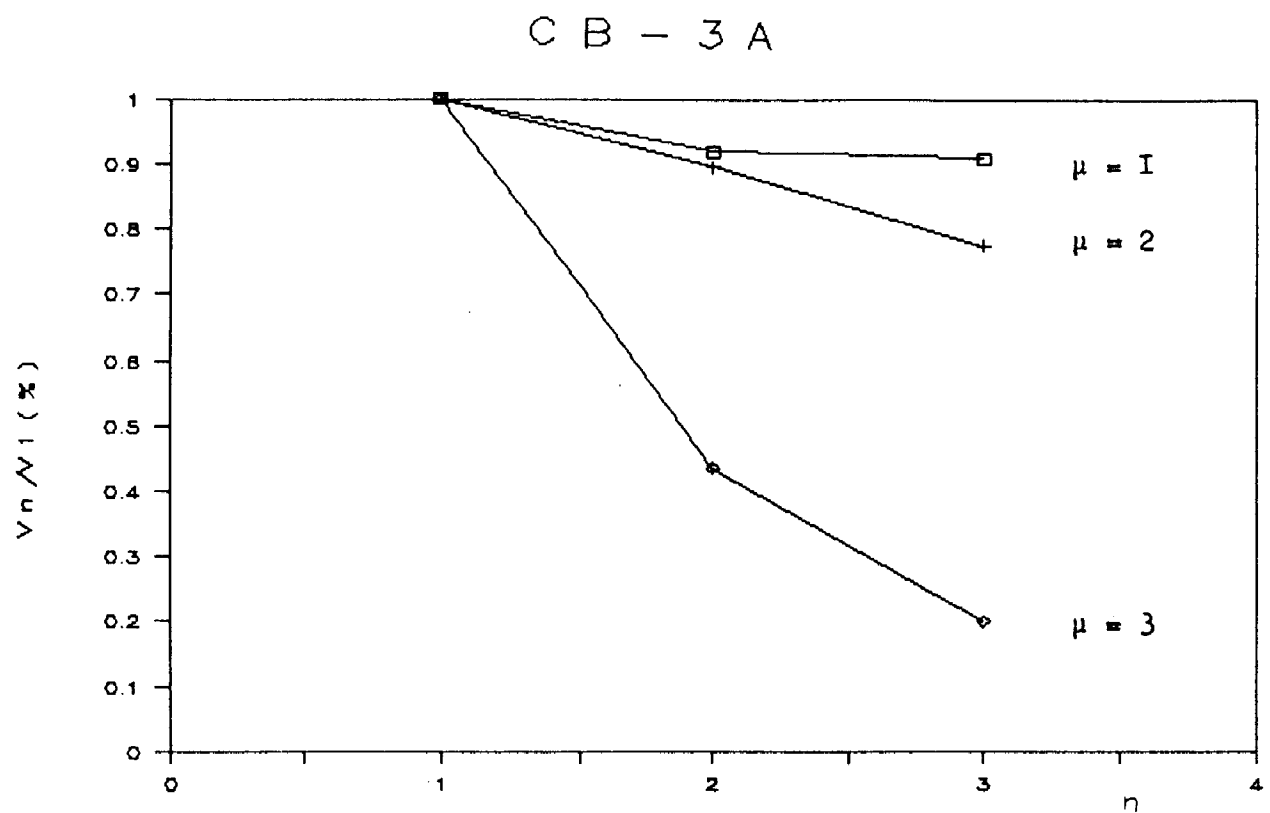
CB - 1 B



Σχ. 5.1 Δοκ. CB-1A,B - Μείωση της αποκρίσεως λόγω ανακυκλώσεων για ίδια στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

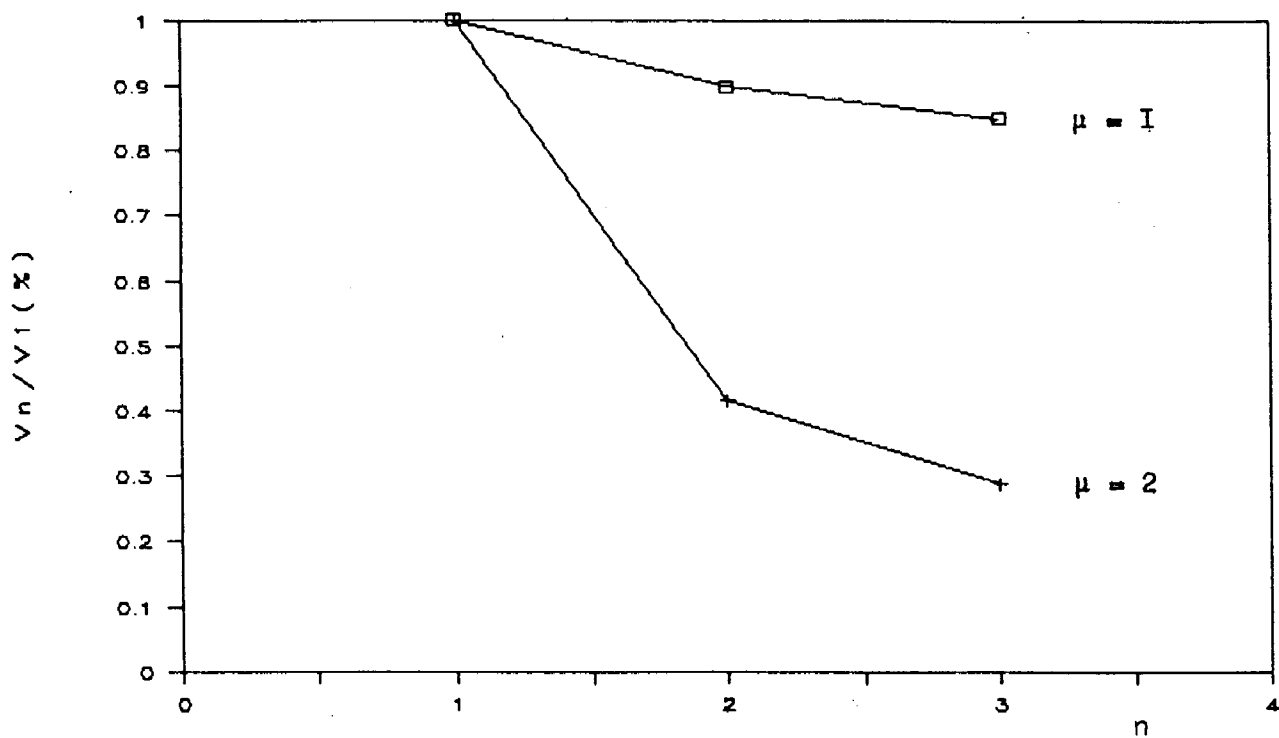


Σχ. 5.2 Δοκ. CB-2A,B - Μείωση της αποκρίσεως λόγω ανακυκλώσεων για ίδια στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

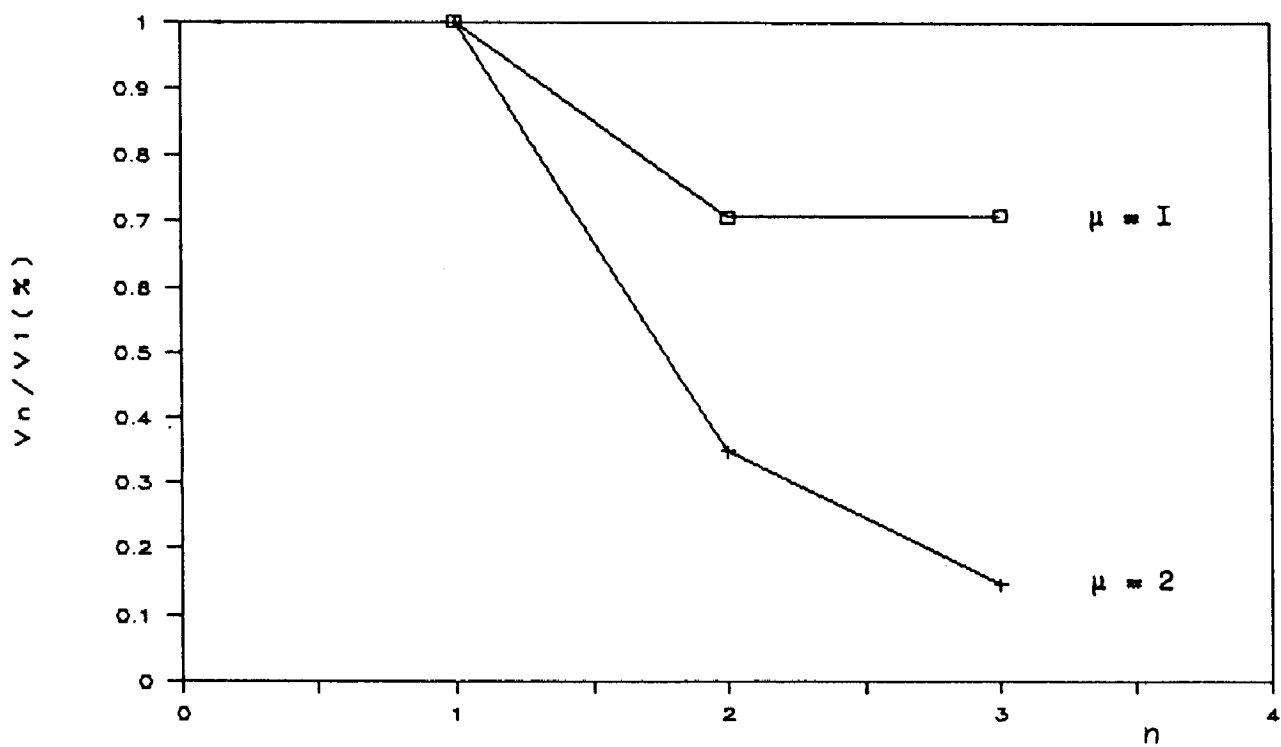


Σχ. 5.3 Δοκ. CB-3A,B - Μείωση της αποκρίσεως λόγω ανακυκλώσεων για ίδια στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

C B - 4 A

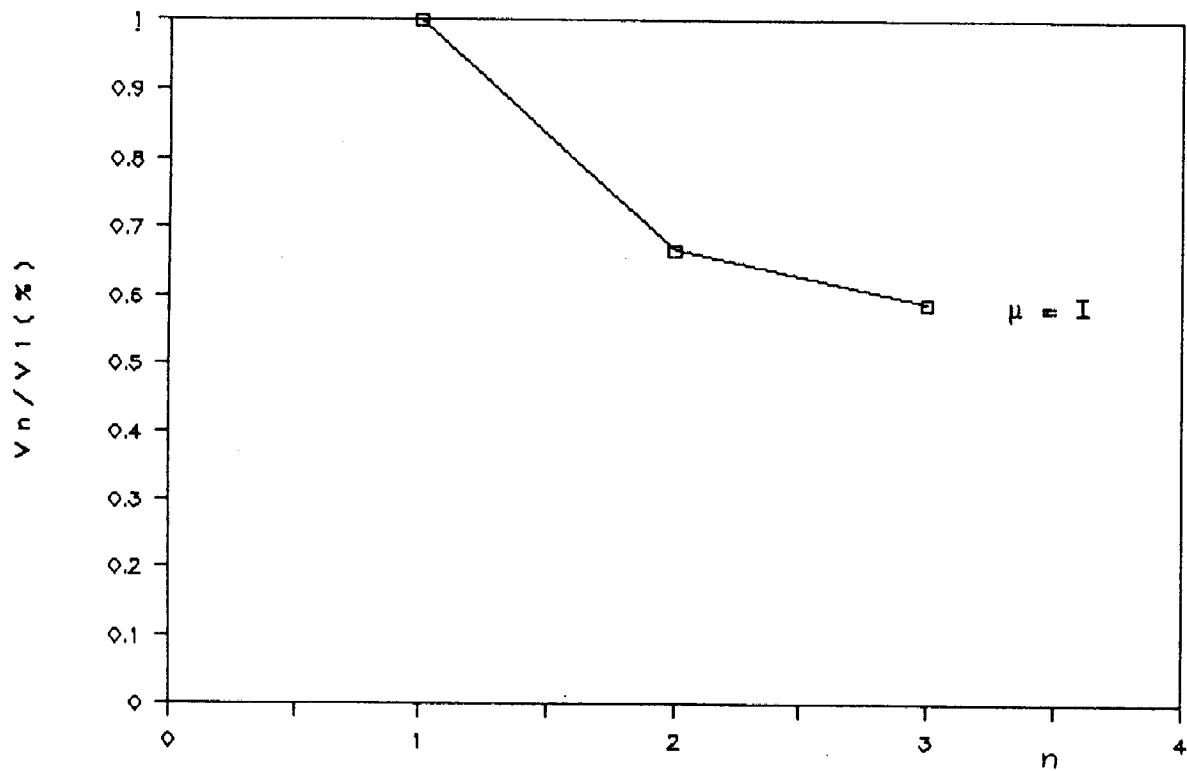


C B - 4 B

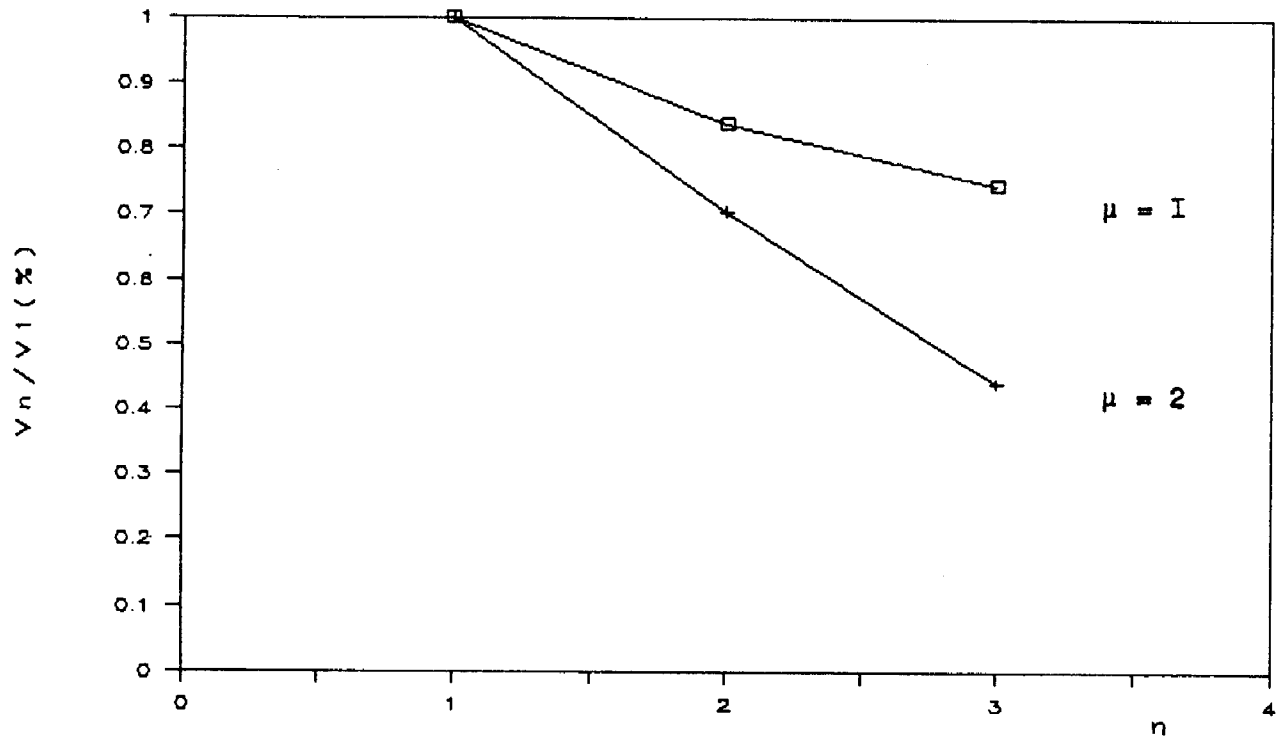


Σχ. 5.4 Δοκ. CB-4A,B - Μείωση της αποκρίσεως λόγω ανακυκλώσεων για ίδια στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

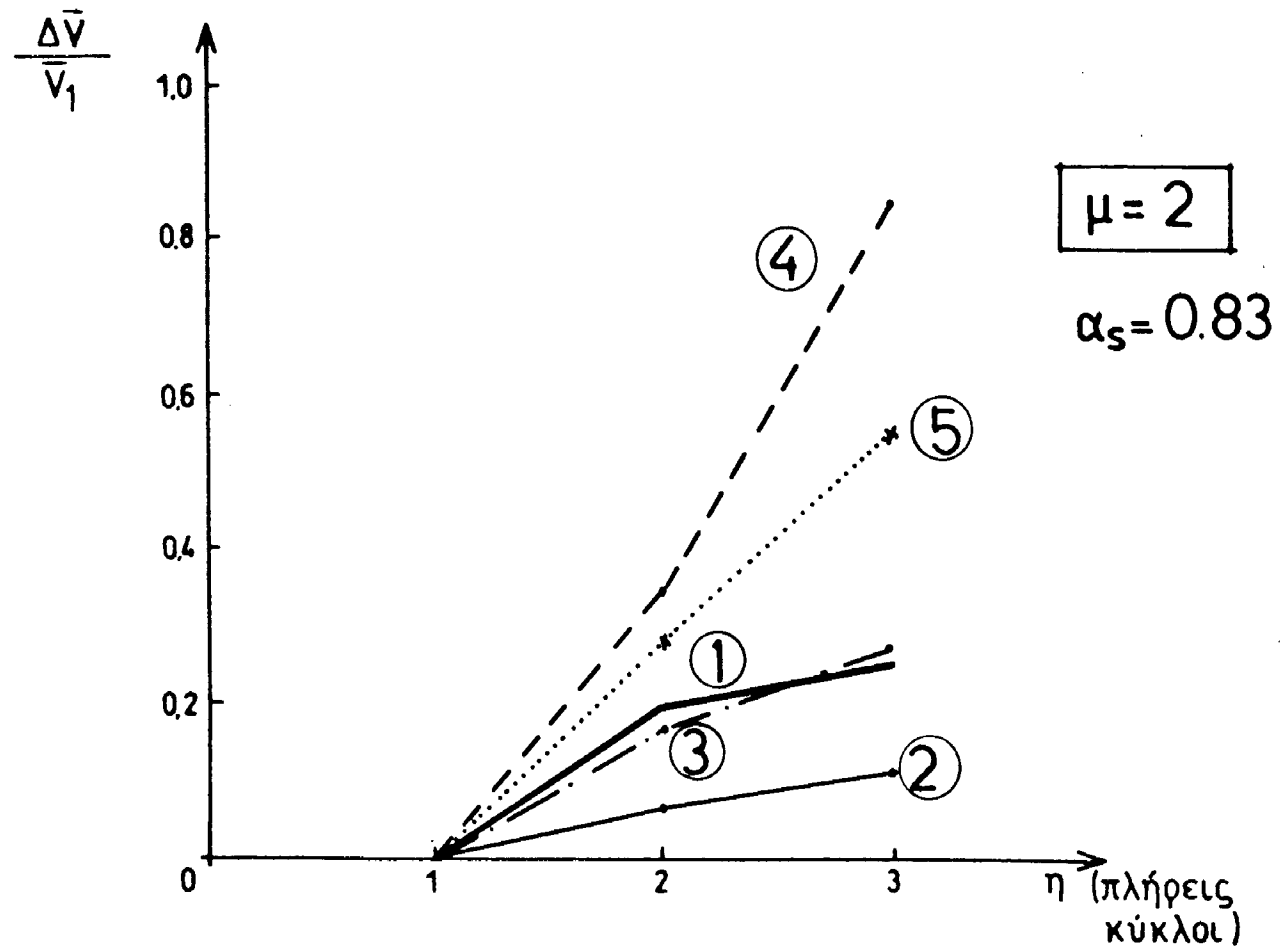
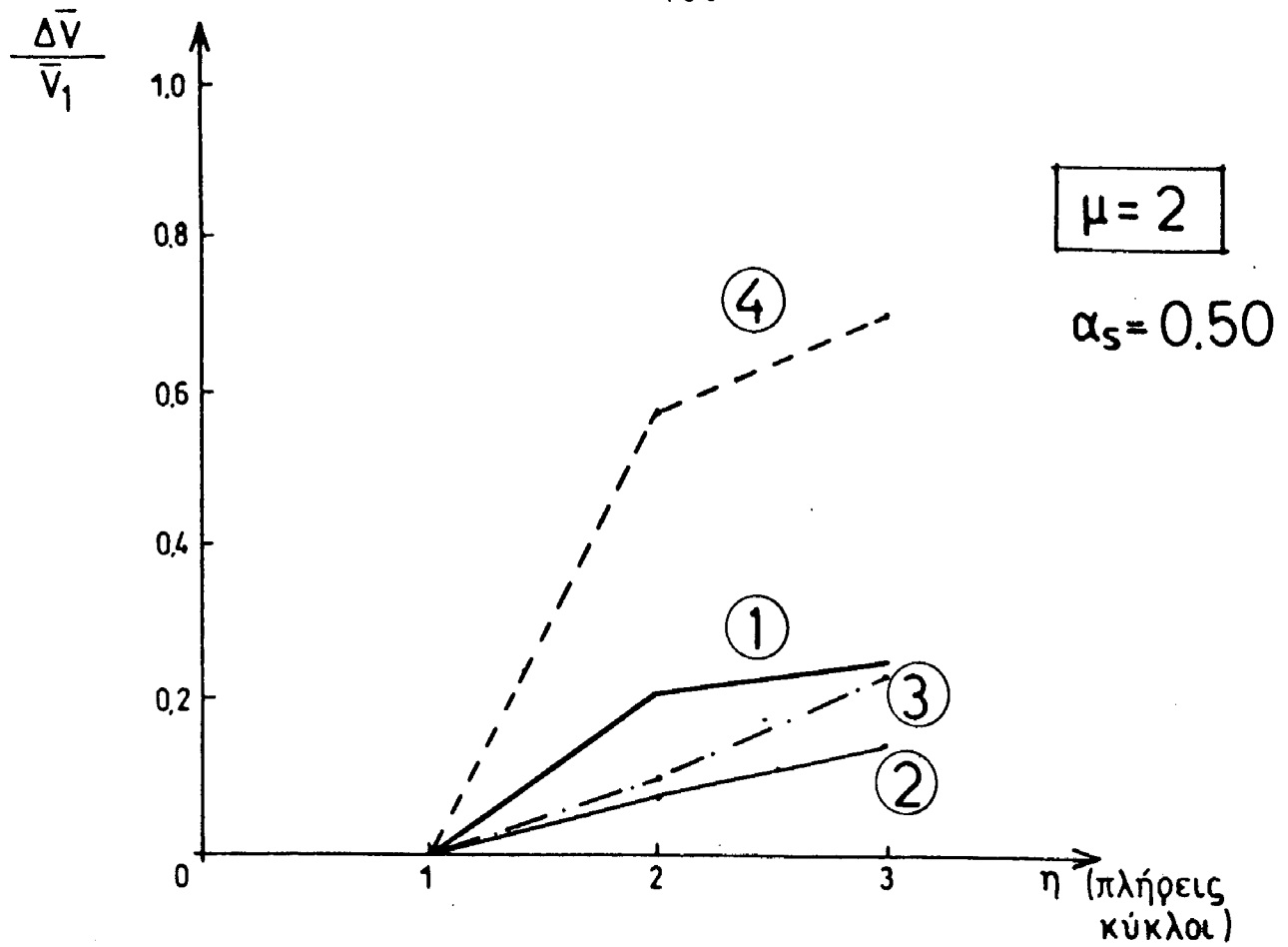
CB - 5 A



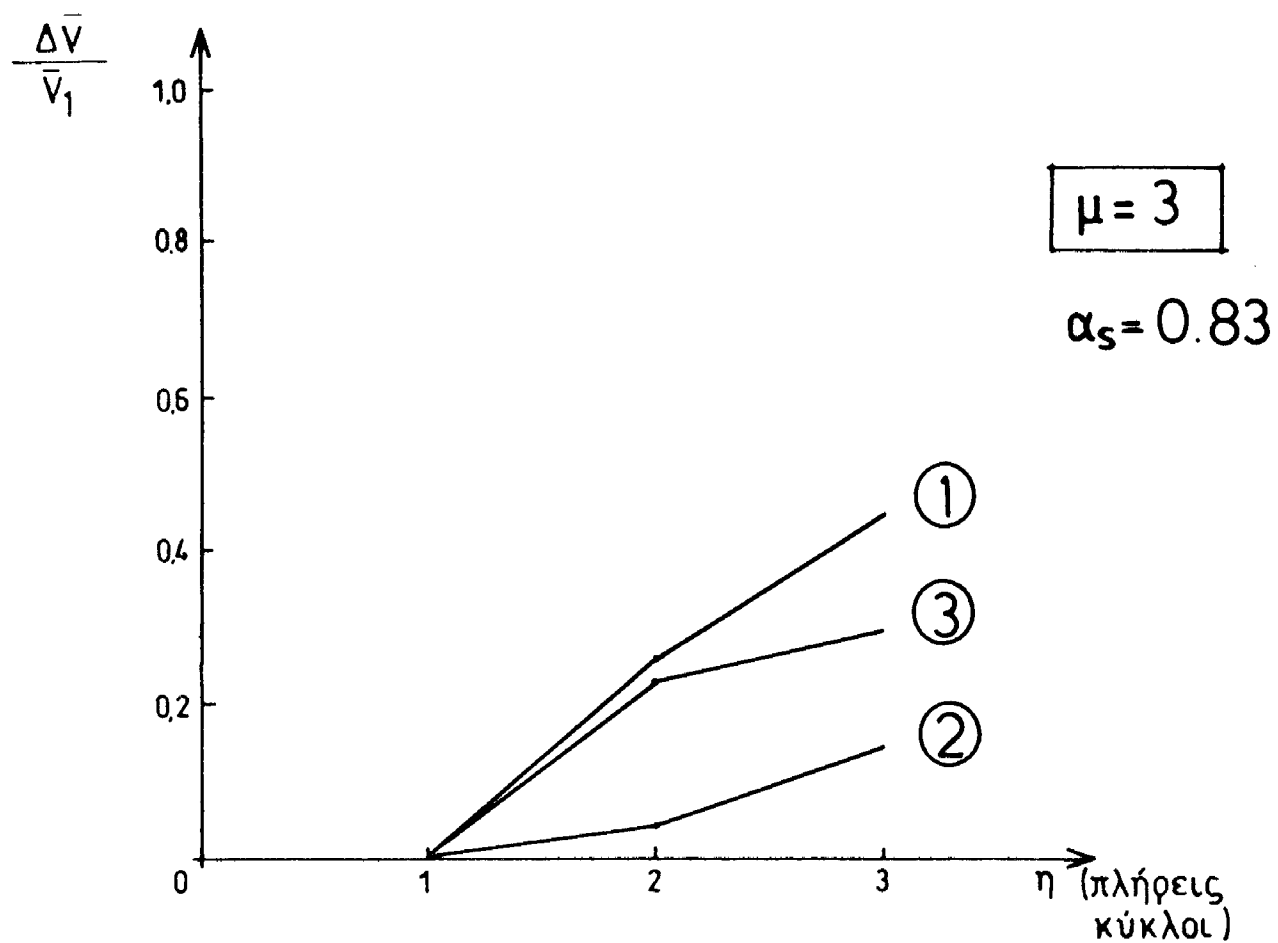
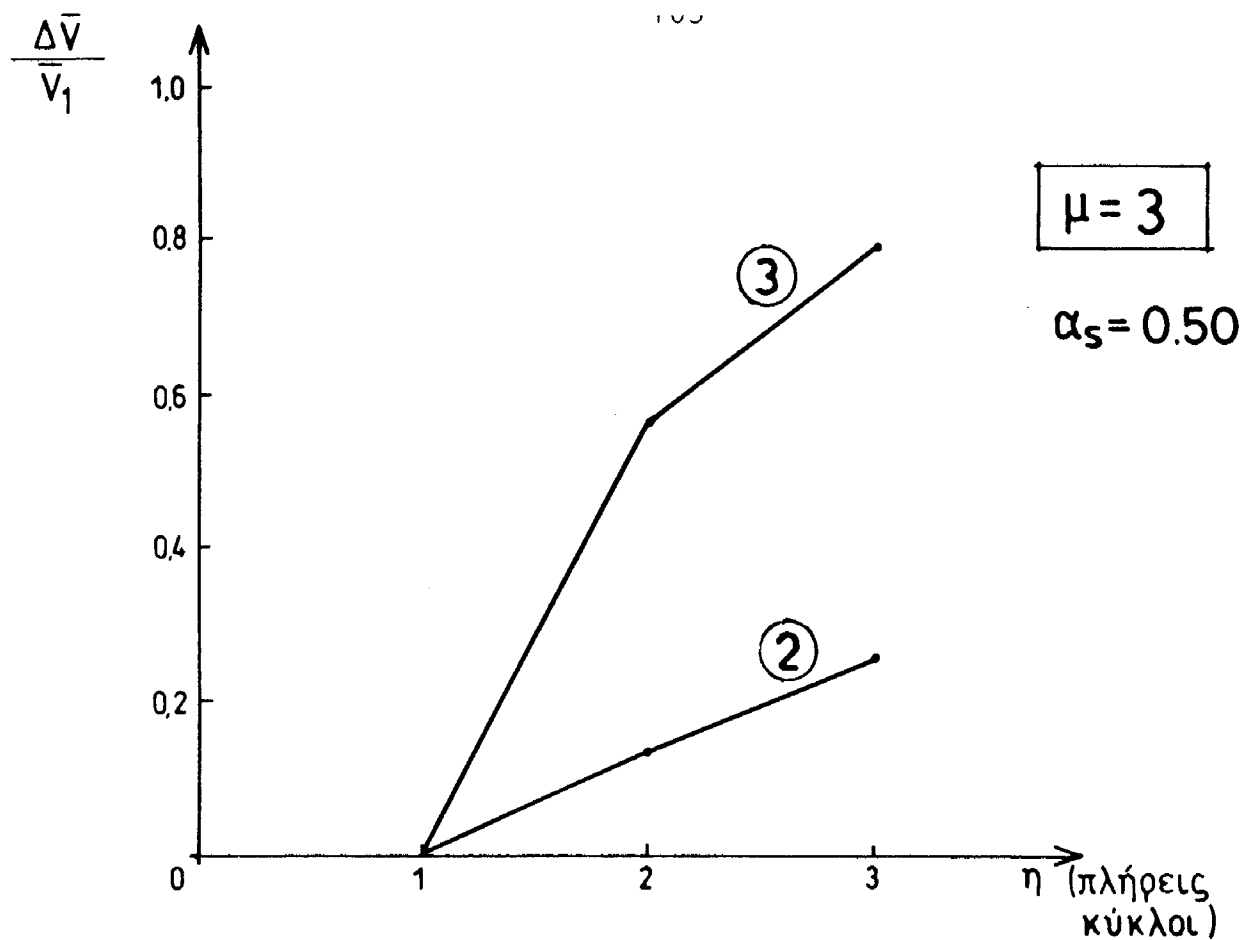
CB - 5 B



Σχ. 5.5 Δοκ. CB-5A,B - Μείωση της αποκρίσεως λόγω ανακυκλίσεων για ίδια στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.



Σχ. 5.6α,β: Μείωση της αποκρίσεως συναρτήσει του αριθμού των κύκλων, σε στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων: $\mu = 2$.



Σχ. 5.7α,β: Μείωση της αποκρίσεως συναρτήσει του αριθμού των κύκλων, για $\mu = 3$.

CB - 1A

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	179.00	190.00	184.50	1.00
	2	170.00	184.19	177.10	0.96
	3	142.51	178.63	160.57	0.87
M=2	1	212.00	195.76	203.88	1.00
	2	148.45	173.00	160.73	0.79
	3	140.12	164.96	152.54	0.75

CB - 2A

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	214.25	146.20	180.23	1.00
	2	210.00	147.00	178.50	0.99
	3	202.53	144.59	173.56	0.96
M=2	1	283.54	234.10	258.82	1.00
	2	256.00	219.21	237.61	0.92
	3	237.30	210.03	223.67	0.86
M=3	1	265.00	223.16	244.08	1.00
	2	224.70	195.60	210.15	0.86
	3	185.32	174.36	179.84	0.74

Πίνακας 5.1 Δοκ. CB-A - Χαρακτηριστικές τιμές φορτίου στις κορυφές των κύκλων φορτίσεως.

CB - 3A

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	183.65	105.65	144.65	1.00
	2	162.86	103.35	133.11	0.92
	3	170.01	93.00	131.51	0.91
M=2	1	302.22	231.47	266.85	1.00
	2	272.00	205.98	238.99	0.90
	3	217.00	196.00	206.50	0.77
M=3	1	219.94	110.41	165.18	1.00
	2	95.08	48.42	71.75	0.43
	3	66.44	0.00	33.22	0.20

CB - 4A

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	282.30	253.44	267.87	1.00
	2	251.32	230.19	240.76	0.90
	3	239.80	215.28	227.54	0.85
M=2	1	205.00	110.00	157.50	1.00
	2	64.97	66.00	65.49	0.42
	3	43.36	47.70	45.53	0.29

CB - 5A

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	237.00	198.50	217.75	1.00
	2	114.00	176.67	145.34	0.67
	3	97.35	159.10	128.23	0.59

Πίνακας 5.1 (συνέχεια): Δοκ. CB-A - Χαρακτηριστικές τιμές φορτίου στις κορυφές των κύκλων φορτίσεως.

CB - 1B

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
1	1	100.28	95.96	98.12	1.00
	2	94.93	89.14	92.04	0.94
	3	92.58	93.54	93.06	0.95
2	1	124.16	108.00	116.08	1.00
	2	95.74	91.00	93.37	0.80
	3	83.65	87.46	85.56	0.74
3	1	108.00	102.00	105.00	1.00
	2	63.07	91.00	77.04	0.73
	3	41.75	74.13	57.94	0.55

CB - 2B

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	114.85	82.26	98.56	1.00
	2	114.71	76.25	95.48	0.97
	3	110.00	74.20	92.10	0.93
M=2	1	167.44	137.78	152.61	1.00
	2	156.68	126.00	141.34	0.93
	3	153.82	114.00	133.91	0.88
M=3	1	170.00	142.68	156.34	1.00
	2	157.85	138.15	148.00	0.95
	3	131.70	135.00	133.35	0.85

Πίνακας 5.2 Δοκ. CB-B - Χαρακτηριστικές τιμές φορτίου στις κορυφές των κύκλων φορτίσεως.

CB - 3B

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	120.79	84.75	102.77	1.00
	2	117.00	83.72	100.36	0.98
	3	109.29	86.80	98.05	0.95
M=2	1	151.48	114.63	133.06	1.00
	2	129.80	89.80	109.80	0.83
	3	111.56	81.45	96.51	0.73
M=3	1	139.00	104.16	121.58	1.00
	2	102.00	84.00	93.00	0.76
	3	92.80	77.00	84.90	0.70

CB - 4B

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	163.00	153.09	158.05	1.00
	2	102.55	121.23	111.89	0.71
	3	105.84	118.22	112.03	0.71
M=2	1	117.70	61.53	89.62	1.00
	2	31.94	30.33	31.14	0.35
	3	26.15	0.00	13.08	0.15

CB - 5B

M=d/dy	n	V (+) (KN)	V (-) (KN)	$\bar{V} n$ (KN)	$\bar{V}n/\bar{V}1$
M=1	1	129.72	102.40	116.06	1.00
	2	98.66	96.00	97.33	0.84
	3	88.00	85.19	86.60	0.75
M=2	1	103.06	101.00	102.03	1.00
	2	65.26	78.72	71.99	0.71
	3	42.78	47.17	44.98	0.44

Πίνακας 5.2 (συνέχεια): Δοκ. CB-B - Χαρακτηριστικές τιμές φορτίου στις κορυφές των κύκλων φορτίσεως.

6. ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΛΟΓΩ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΕΩΝ

Η μεταβολή της ακαμψίας των δοκιμών κατά τις ανακυκλίσεις παριστάνεται συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στα Σχ. 6.1-6.5. Το δεξί τμήμα κάθε διαγράμματος αντιστοιχεί στους θετικούς ημικύκλους φορτίσεως, ενώ το αριστερό στους αρνητικούς που συμβολίζονται με τόνο. Το φορτίο εκφράζεται ως ποσοστό του μεγίστου φορτίου (κατ' απόλυτη τιμή) του κάθε δοκιμίου.

Οι δοκοί που ήταν οπλισμένες με βλήτρα εμφάνισαν πολύ μικρές τιμές ακαμψίας κατά τους κύκλους $n > 4$ (βλ. Σχ. 6.4, 6.5), πράγμα που επιβεβαιώνει την γενικώς κακή συμπεριφορά αυτών των δοκιμών.

Τα διαγράμματα ($K-V_i/V_{max}$) που αντιστοιχούν στις δοκούς CB-2A,B με δισδιαγώνιο οπλισμό διαφέρουν απ' τα αντίστοιχα των άλλων δοκιμών, ιδίως για μεγάλες τιμές του n ($n > 7$). Η ακαμψία είναι σταθερή και πρακτικώς ανεξάρτητη του φορτίου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί όσο προχωρεί η αποδιοργάνωση του σκυροδέματος (με την αύξηση των n) τόσο μεγαλύτερο τμήμα των εξωτερικών δυνάμεων αναλαμβάνουν. Έτσι, η ακαμψία των δοκών αυτών (για μεγάλα n) εξαρτάται κυρίως απ' την ακαμψία των δισδιαγώνιων στοιχείων του χάλυβα, γι' αυτό και εμφανίζεται σταθερή. Ενώ στις άλλες δοκούς όπου η ακαμψία εξαρτάται απ' τον χάλυβα καί απ' το σκυρόδεμα, η ακαμψία εξακολουθεί να μεταβάλλεται γραμμικώς συναρτήσει του φορτίου και για μεγάλα n .

Στα Σχ. 6.6α-ε παριστάνεται ο λόγος της μέγιστης τιμής $K_{max,i}$ της ακαμψίας του κάθε ημικύκλου - θετικών και αρνητικών - προς την (μέγιστη) αρχική ακαμψία $K_{max,1+}$ του πρώτου θετικού ημικύκλου ($n = 1+$), συναρτήσει του πλήθους n των κύκλων φορτίσεως. Το κάθε σχήμα αντιστοιχεί στα ζεύγη δοκιμών με τον ίδιο τρόπο οπλίσεως.

Τα δοκίμια CB-A με τον μικρό λόγο διατμήσεως: $\alpha_s = 0.50$ εμφάνισαν μεγαλύτερη ακαμψία απ' τα αντίστοιχα CB-B με $\alpha_s = 0.83$, τόσο κατά τους θετικούς όσο και κατά τους αρνητικούς ημικύκλους, εκτός απ' την περίπτωση δισδιαγώνιων οπλισμών-δοκ. CB-2A,B, βλ. Σχ. 6.6β -.

Στα Σχ. 6.7, 6.8 φαίνεται η μεταβολή του λόγου $K_{\max,i}/K_{\max,1+}$ συναρτήσει του πλήθους n των θετικών ή αρνητικών κύκλων για όλες τις δοκούς με κοινό λόγο διατμήσεως.

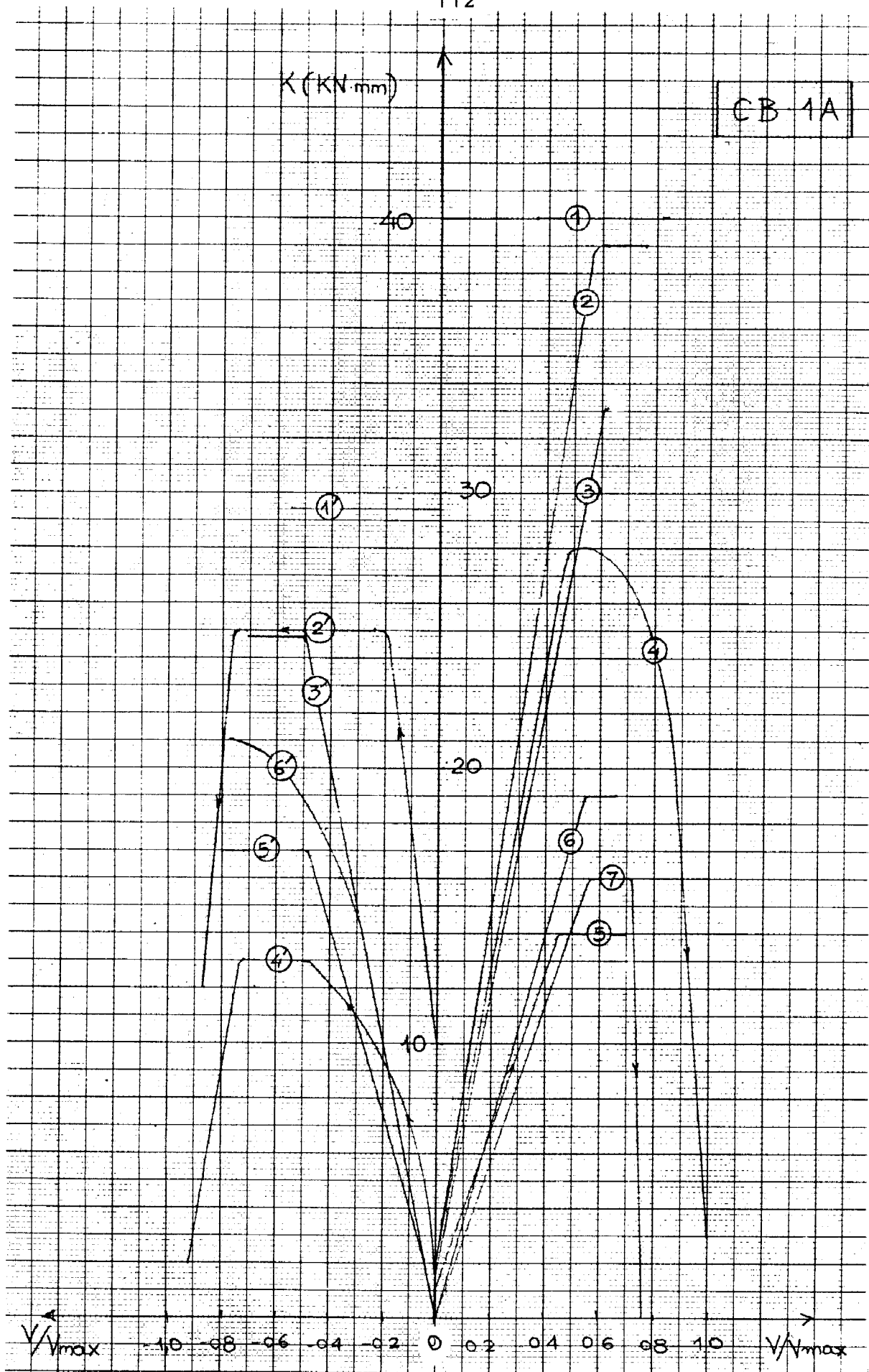
Την μεγαλύτερη μείωση αποκρίσεως εμφανίζουν οι δοκοί με τα βλήτρα CB-4,5.

Για τον λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$ το προφορτισμένο δοκίμιο CB-3A με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα, έχει τη μικρότερη μείωση αποκρίσεως για $n \leq 8$. Το κλασικώς οπλισμένο δοκίμιο για $n \leq 6$, εμφάνισε παρόμοια πτώση ακαμψίας με το δοκίμιο CB-2A με δισδιαγώνιο οπλισμό.

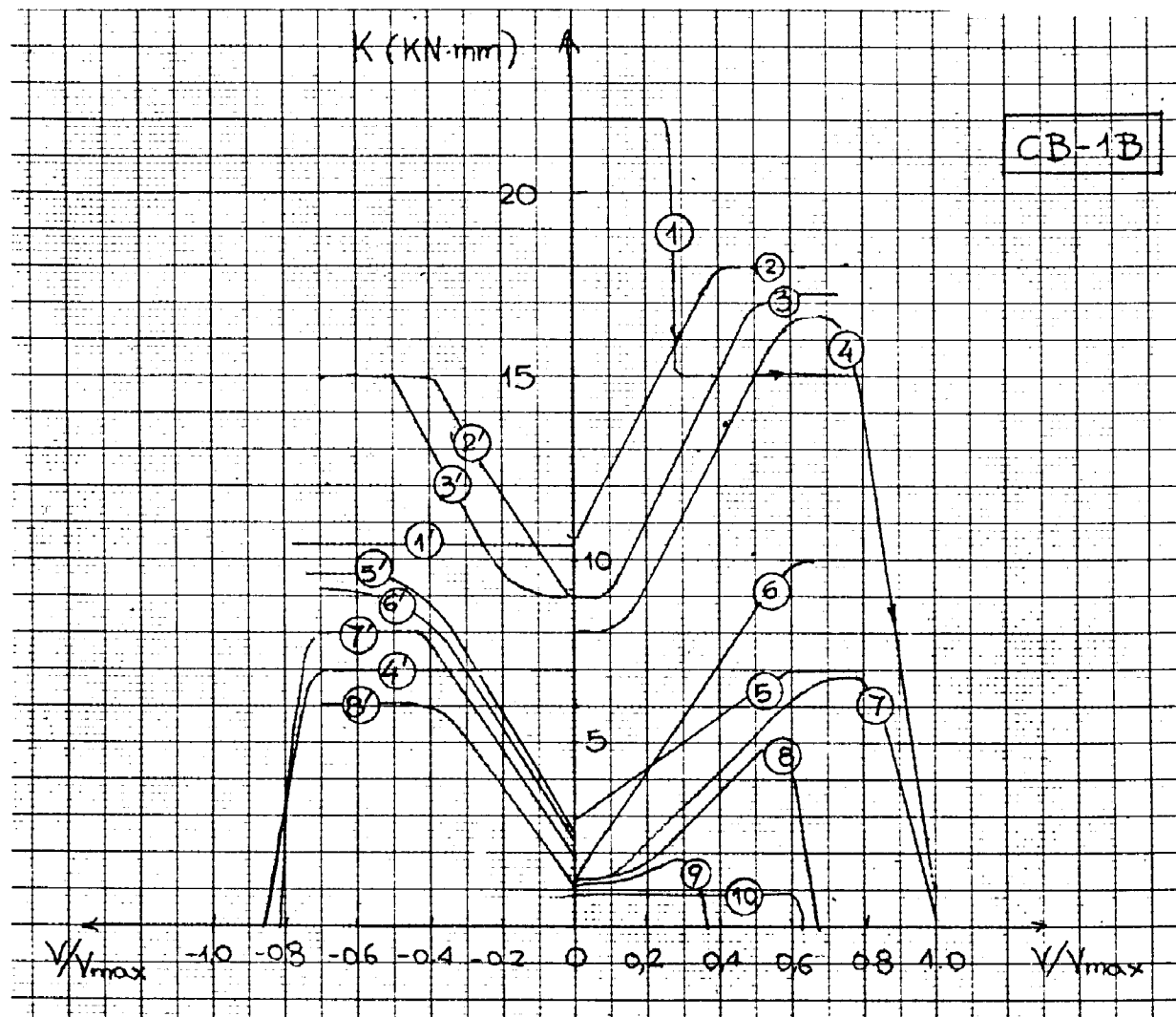
Για τον λόγο $\alpha_s = 0.83$ την μικρότερη μείωση αποκρίσεως εμφανίζει η δοκός με τους δισδιαγώνιους οπλισμούς, ενώ οι δοκοί με την κλασική όπλιση CB-1B και με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα CB-3B - έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Γενικώς δεν παρατηρείται η αναμενόμενη διαφοροποίηση στην μείωση της ακαμψίας των δοκιμίων λόγω των ανακυκλίσεων, ανάλογα με τον τρόπο όπλισης. Εκτός απ' τις δοκούς με τα βλήτρα (CB-4,5) οι οποίες παρουσίασαν εμφανώς μικρότερη ακαμψία απ' τις άλλες, οι δοκοί CB-1,2,3 παρουσίασαν ανάλογη μείωση ακαμψίας.

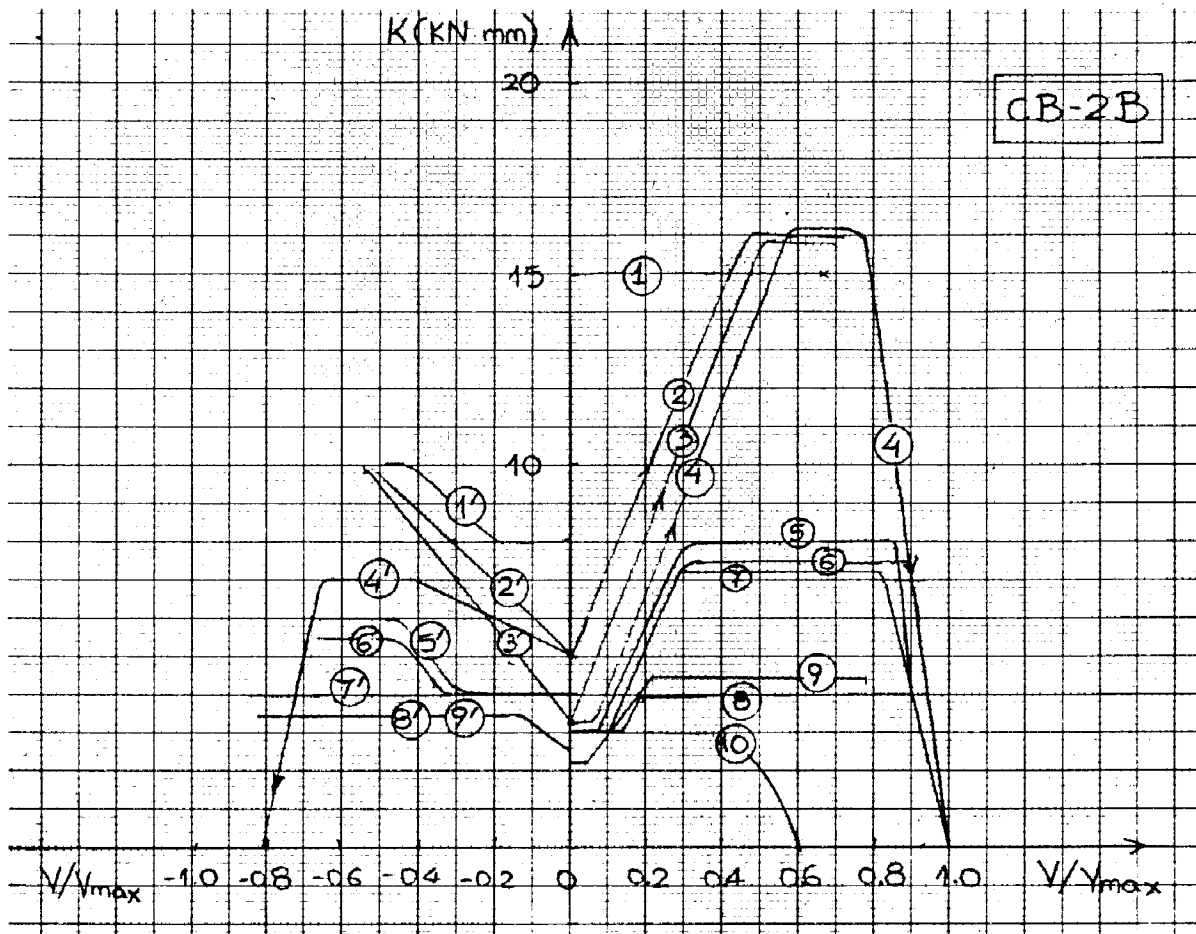
Ετσι, μόνη η μείωση της ακαμψίας λόγω ανακυκλίσεων δεν είναι ενδεικτική της καθολικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των δοκών συζεύξεως.



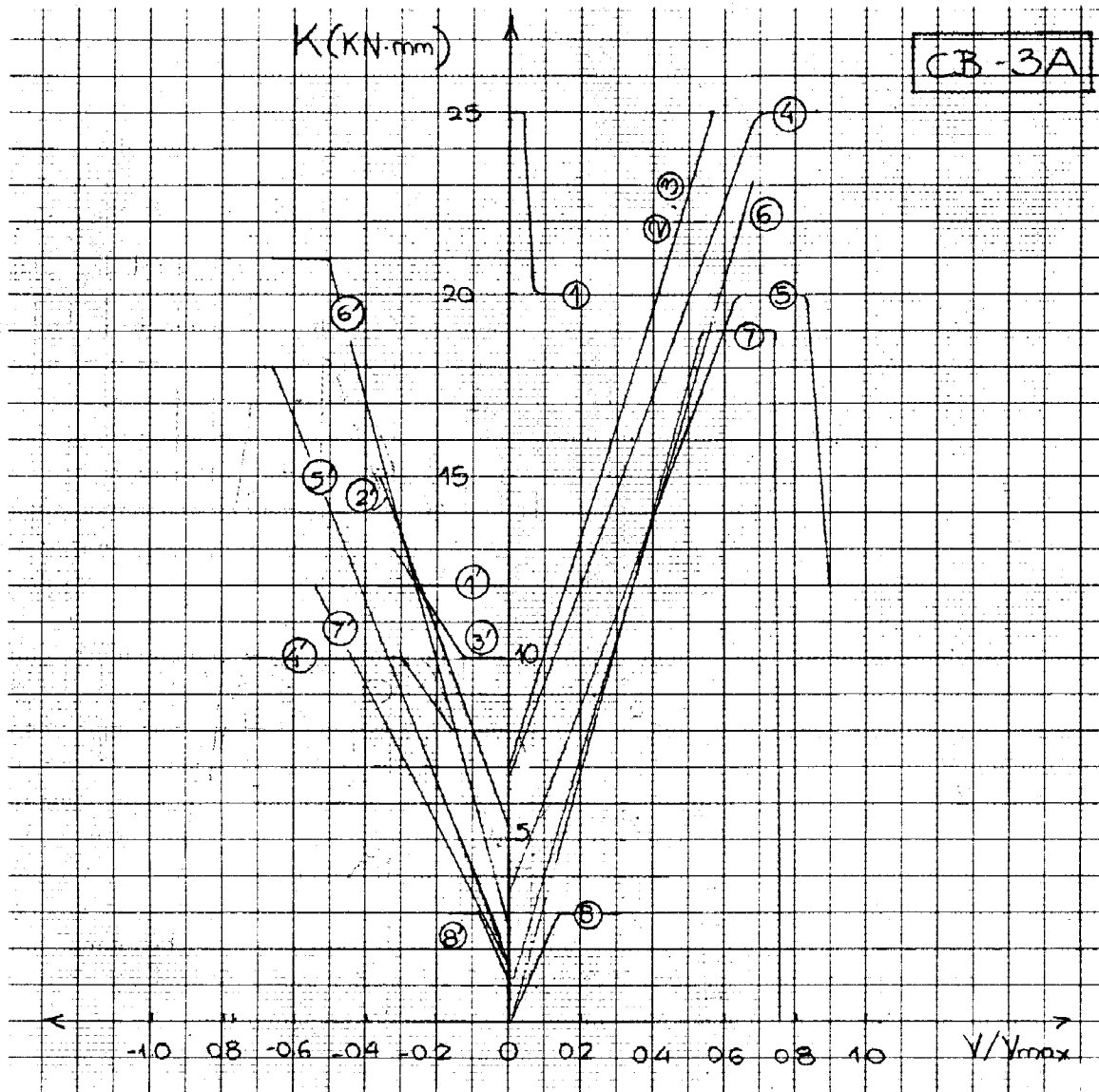
Σχ. 6.1α: CB-1A. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλώσεις συναρτήσει του φορτίου.



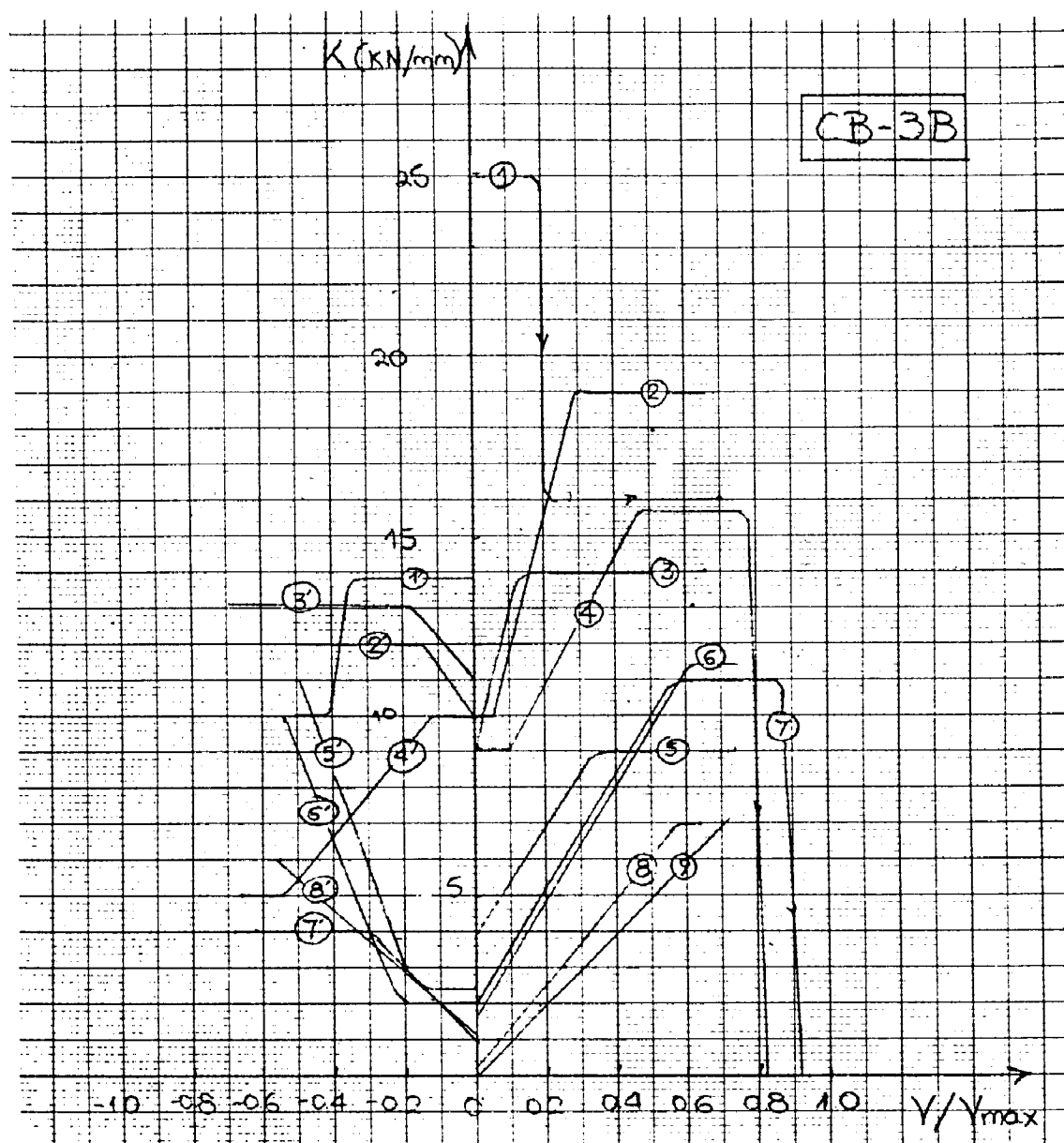
Σχ. 6.1β: CB-1B. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλώσεις συναρτήσει του φορτίου.



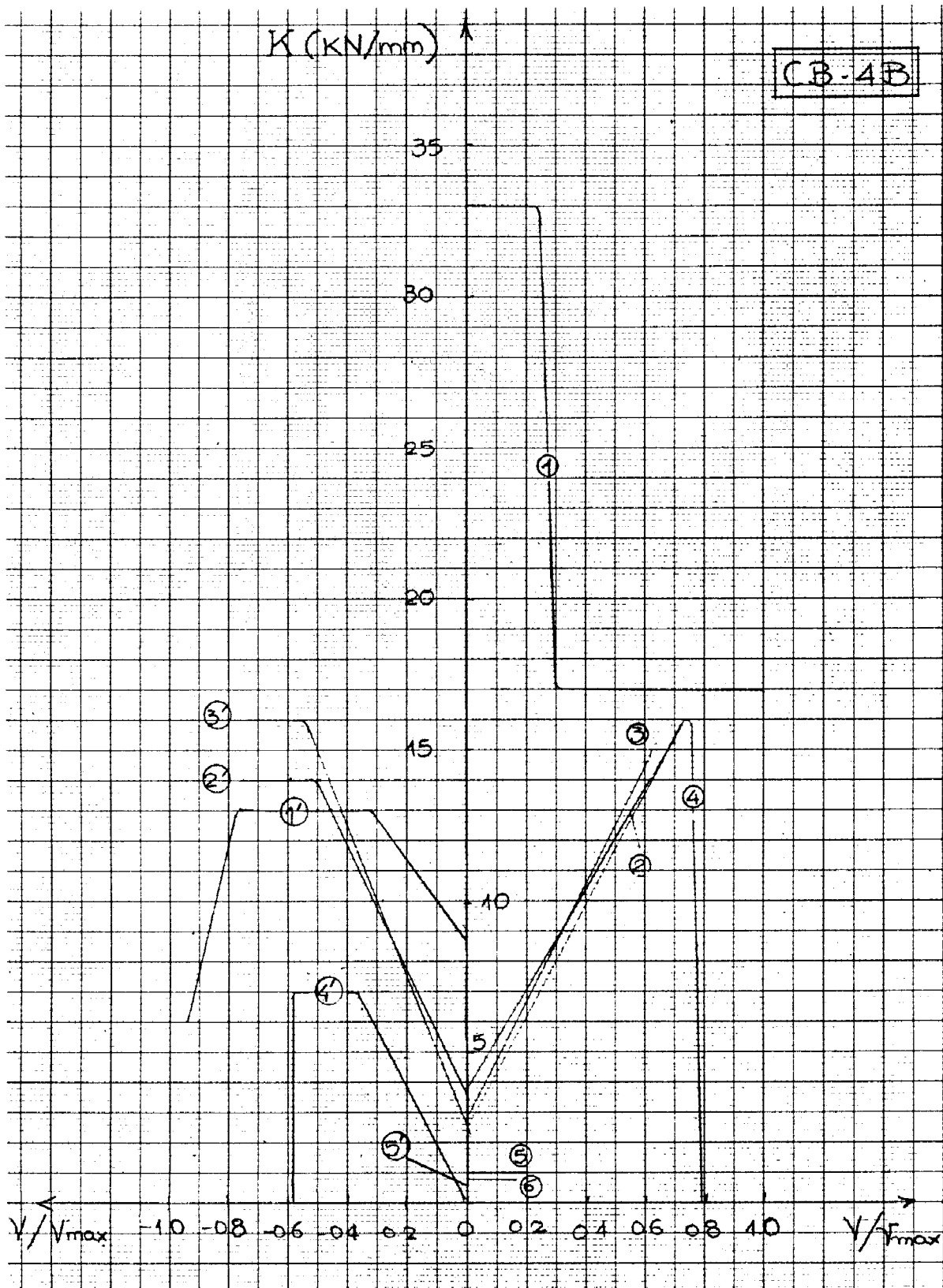
Σχ. 6.2β: CB-2B. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλίσεις συναρτήσει του φορτίου.



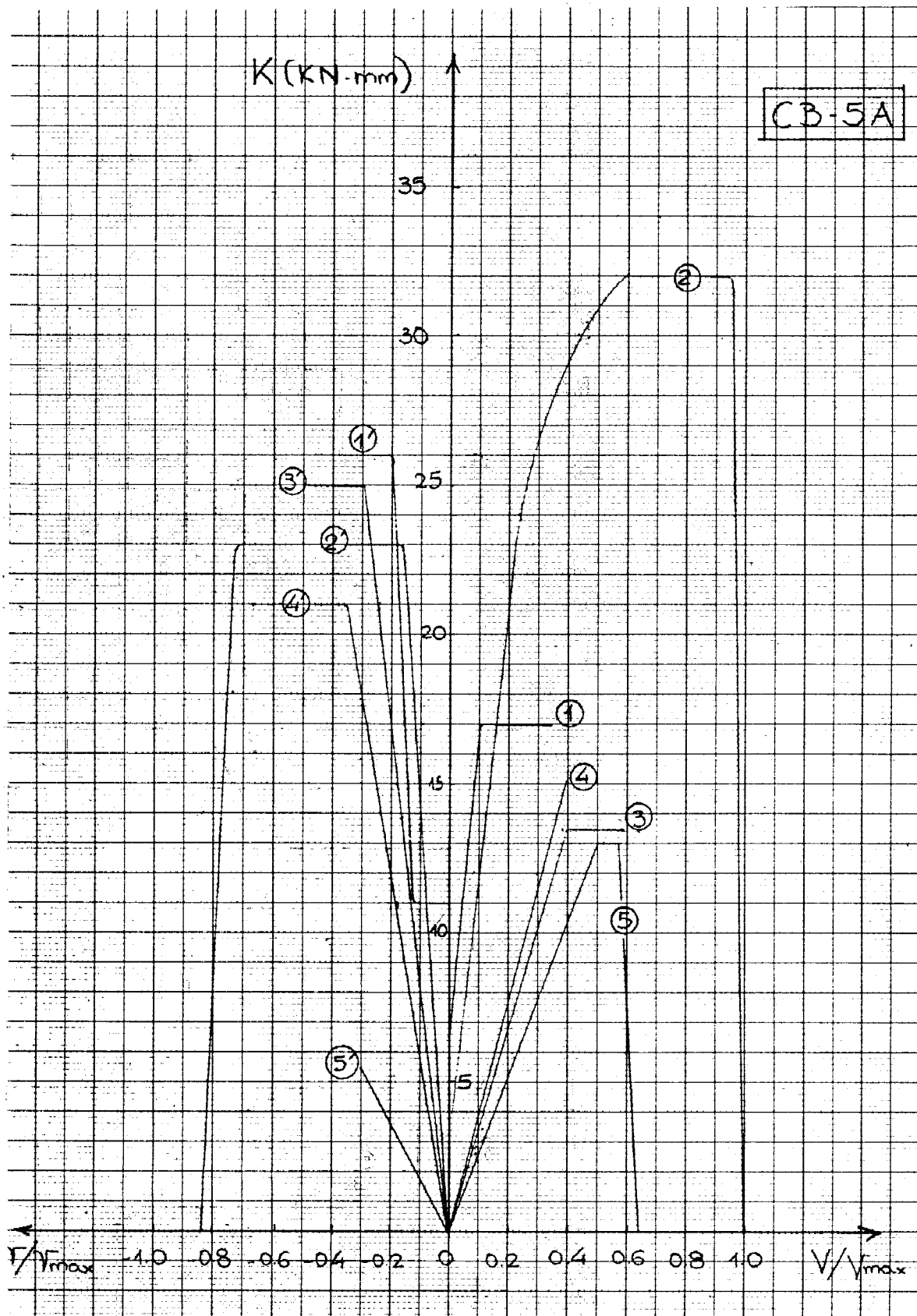
Σχ. 6.3α: CB-3A. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλίσεις συναρτήσει του φορτίου.



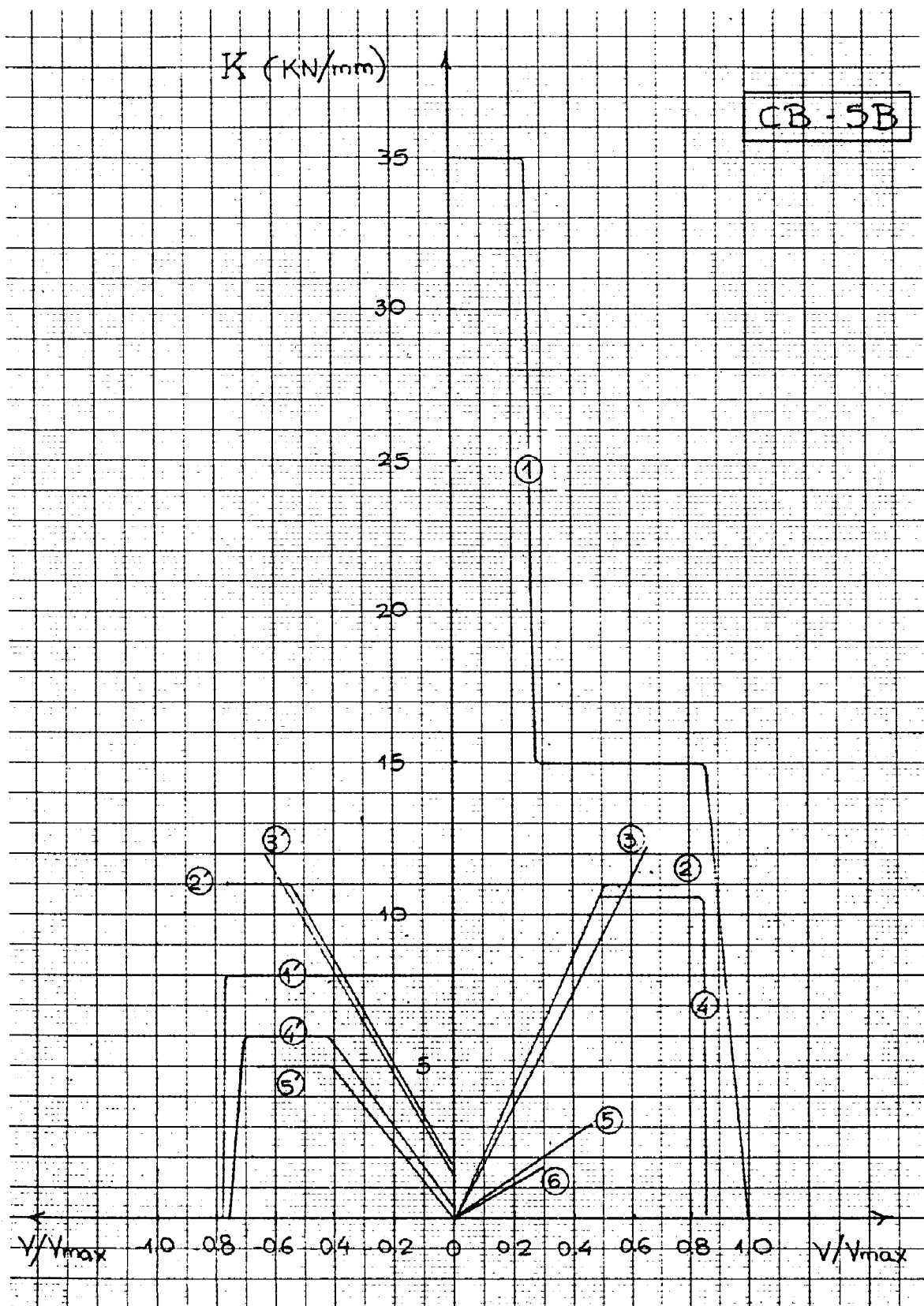
Σχ. 6.3β: CB-3B. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλίσεις συναρτήσει του φορτίου.



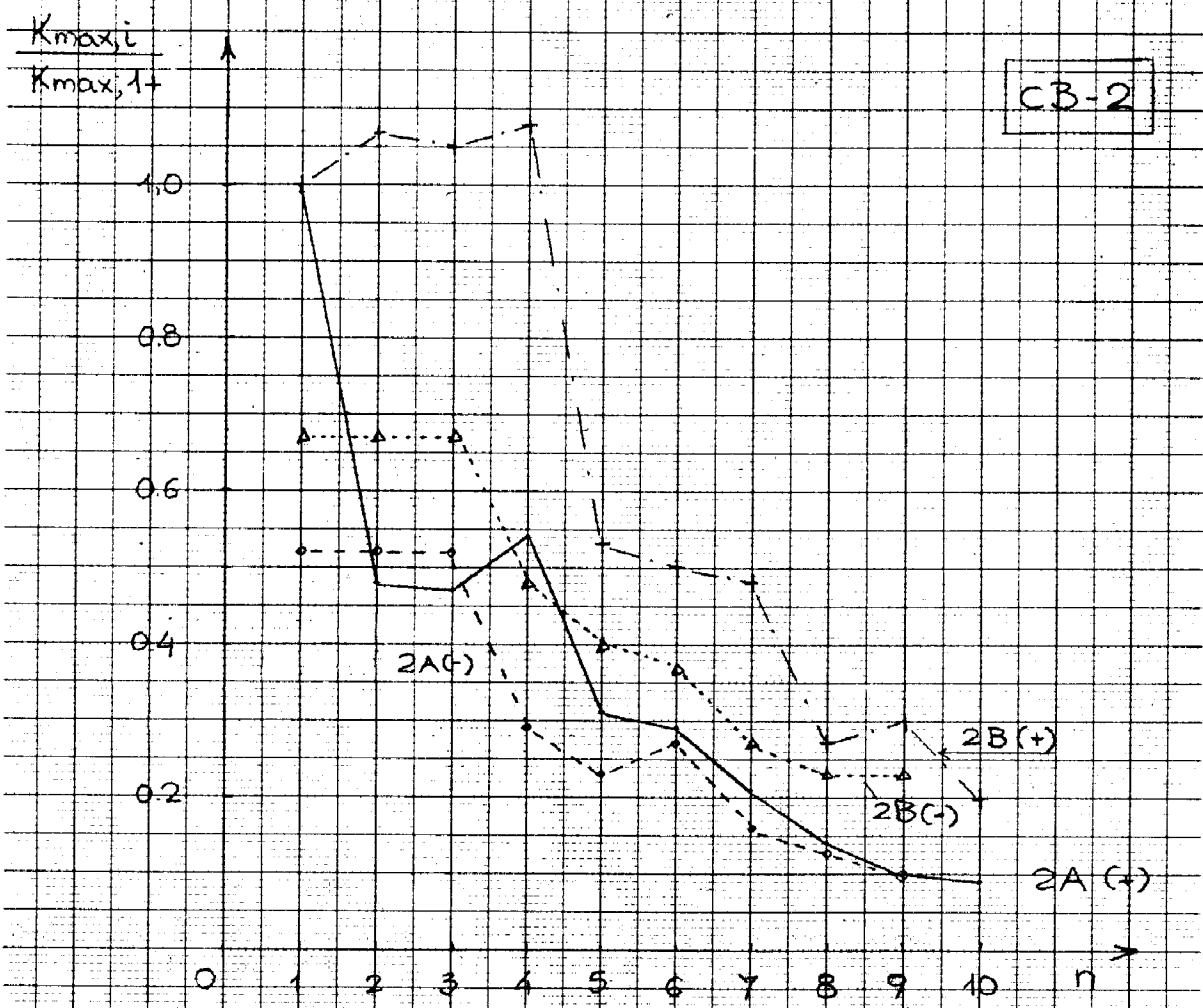
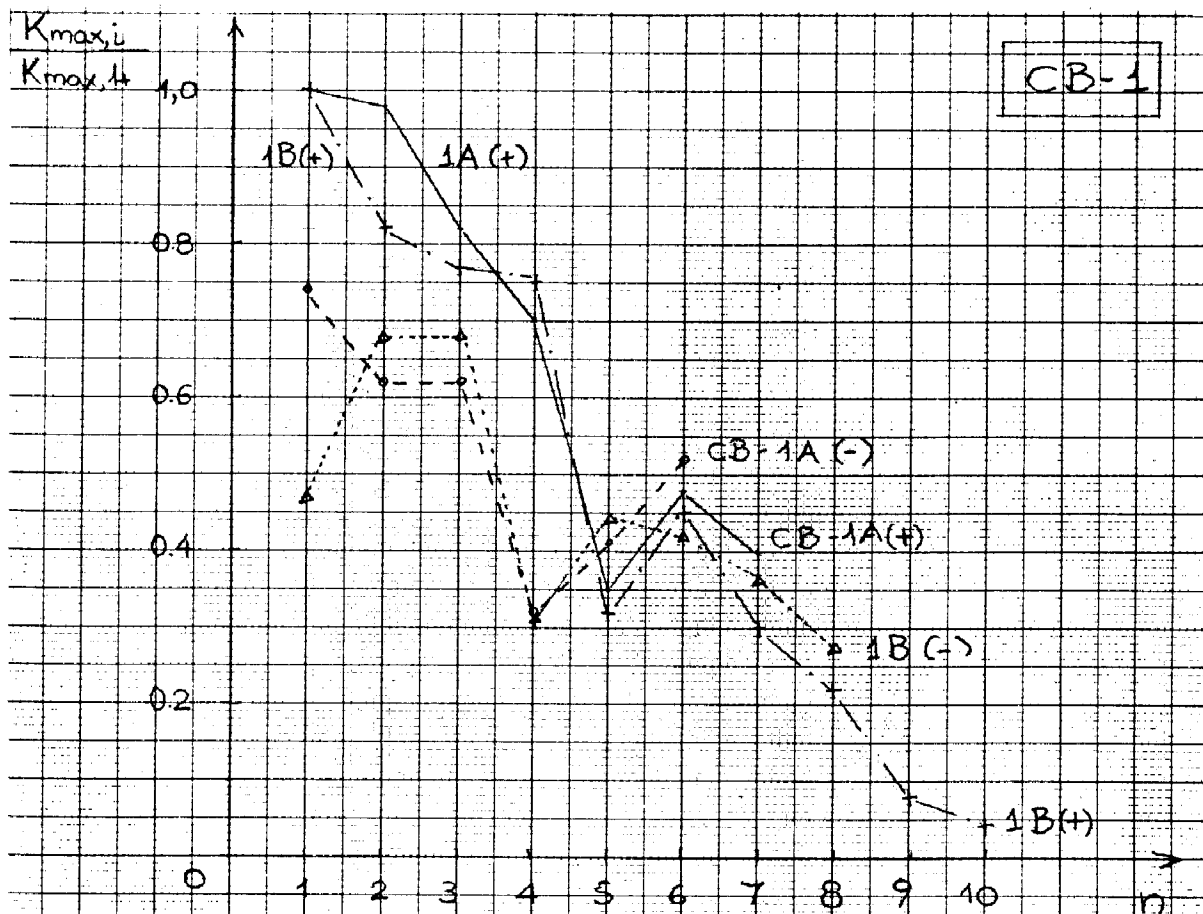
Σχ. 6.4β: CB-4B. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλώσεις συναρτήσει του φορτίου.



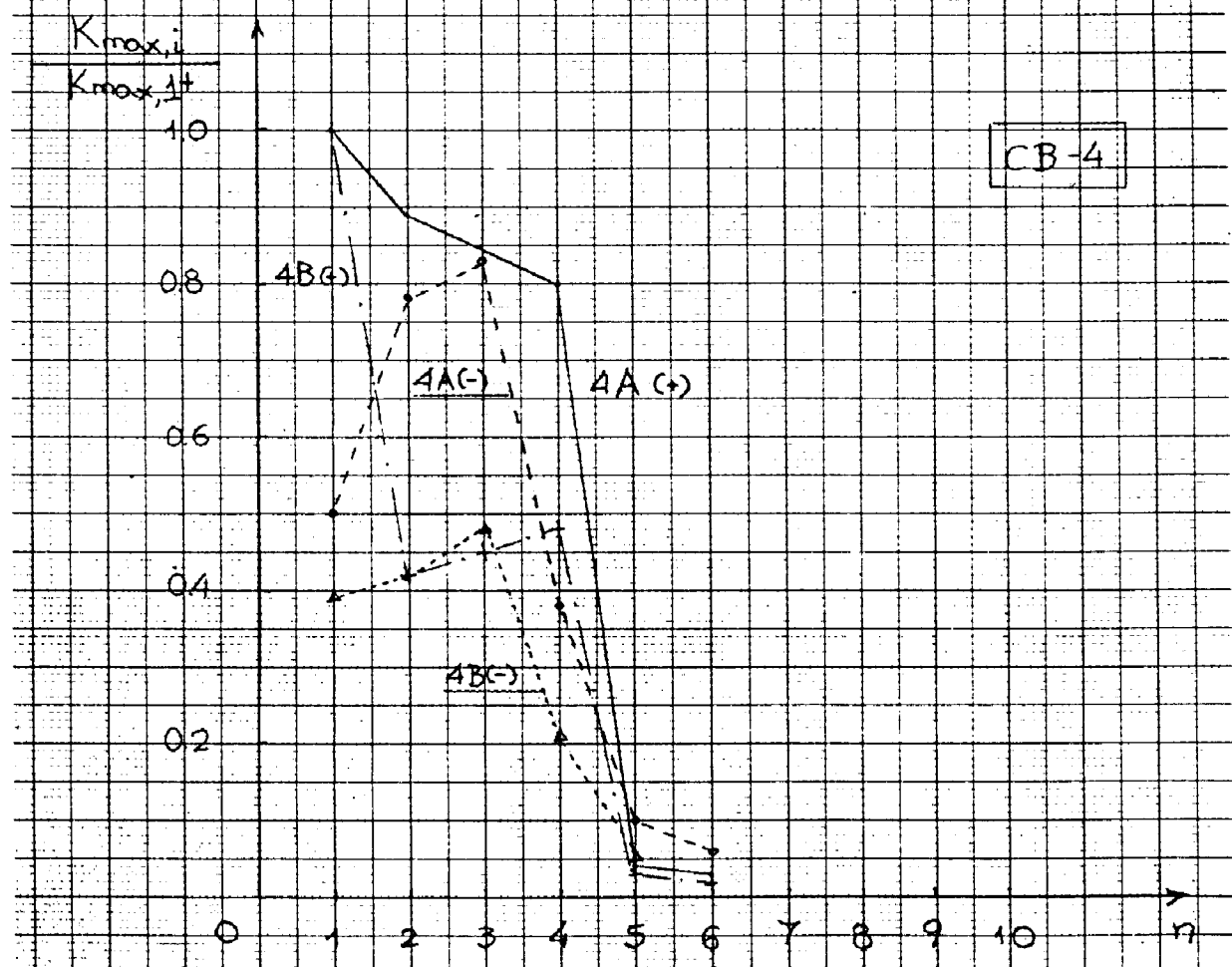
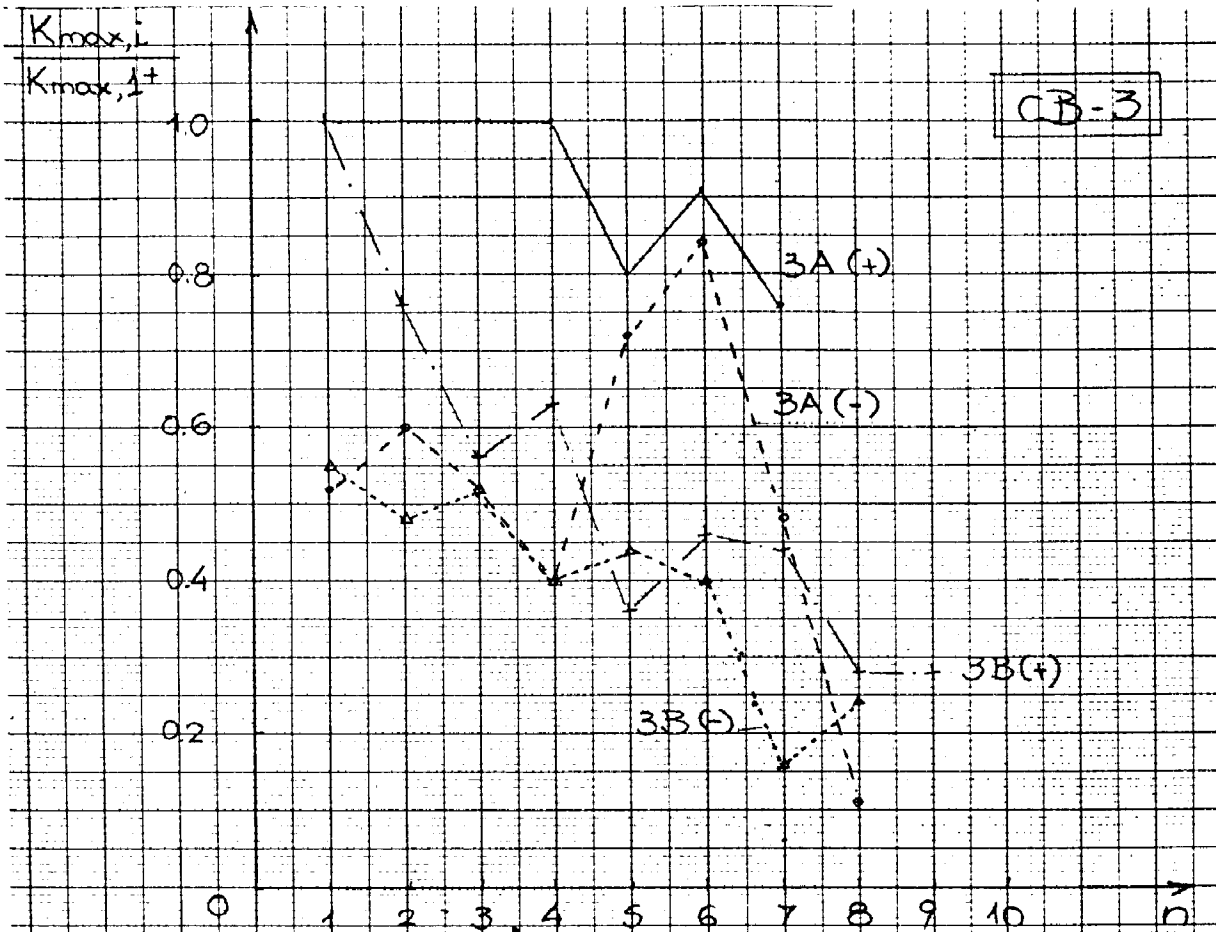
Σχ. 6.5α: CB-5A. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλίσεις συναρτήσει του φορτίου.



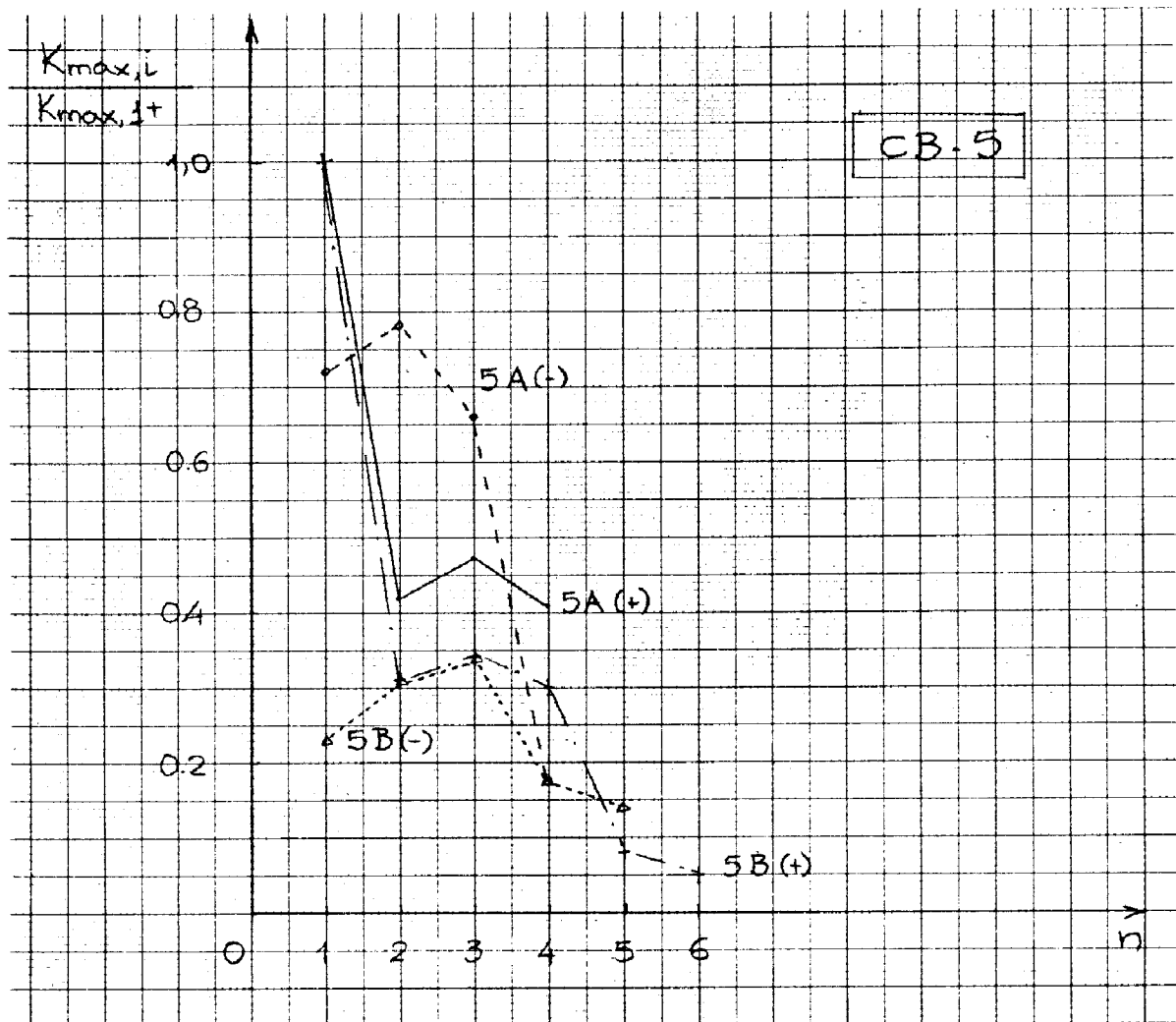
Σχ. 6.5β: CB-5B. Μεταβολή της ακαμψίας κατά τις ανακυκλίσεις συναρτήσει του φορτίου.



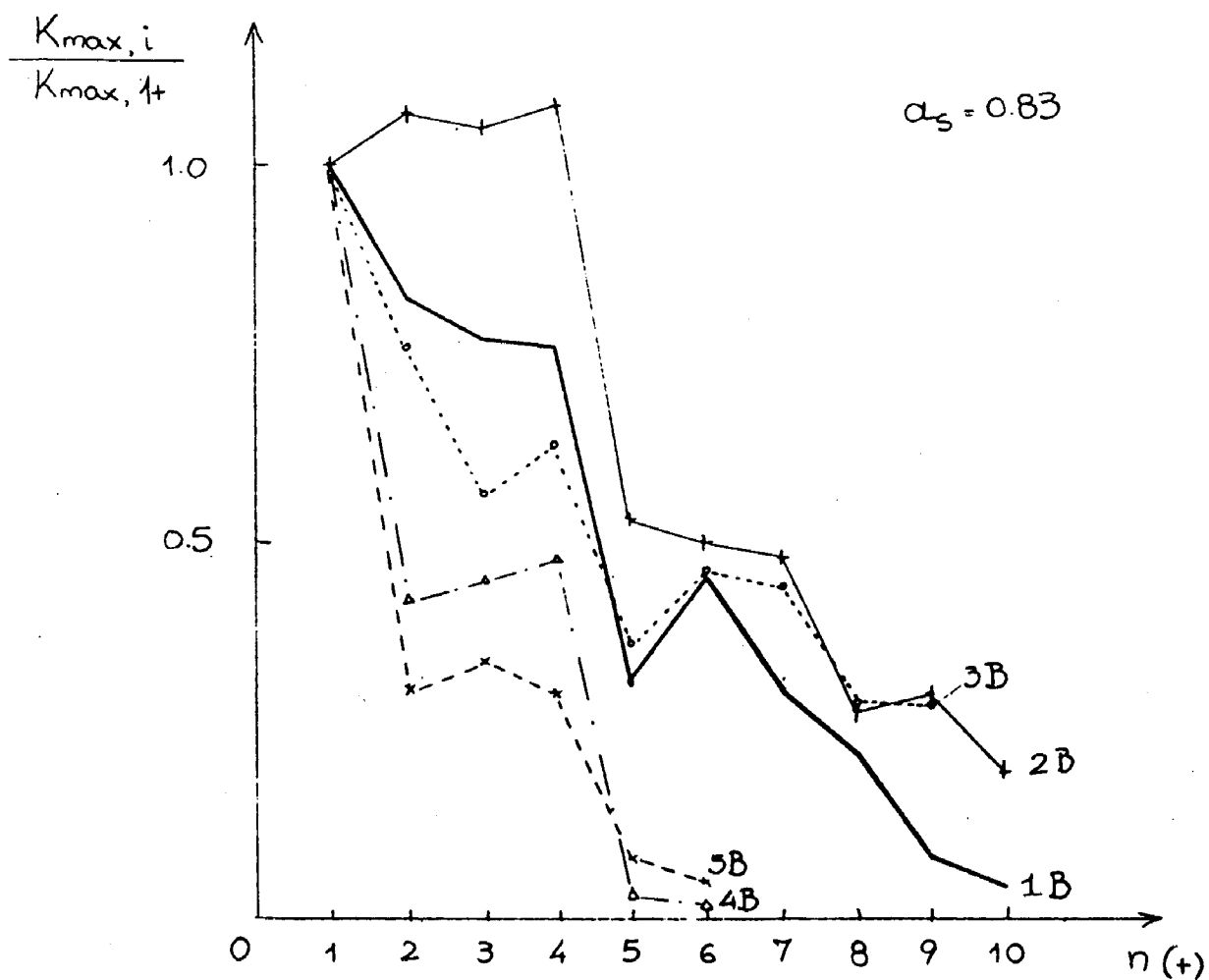
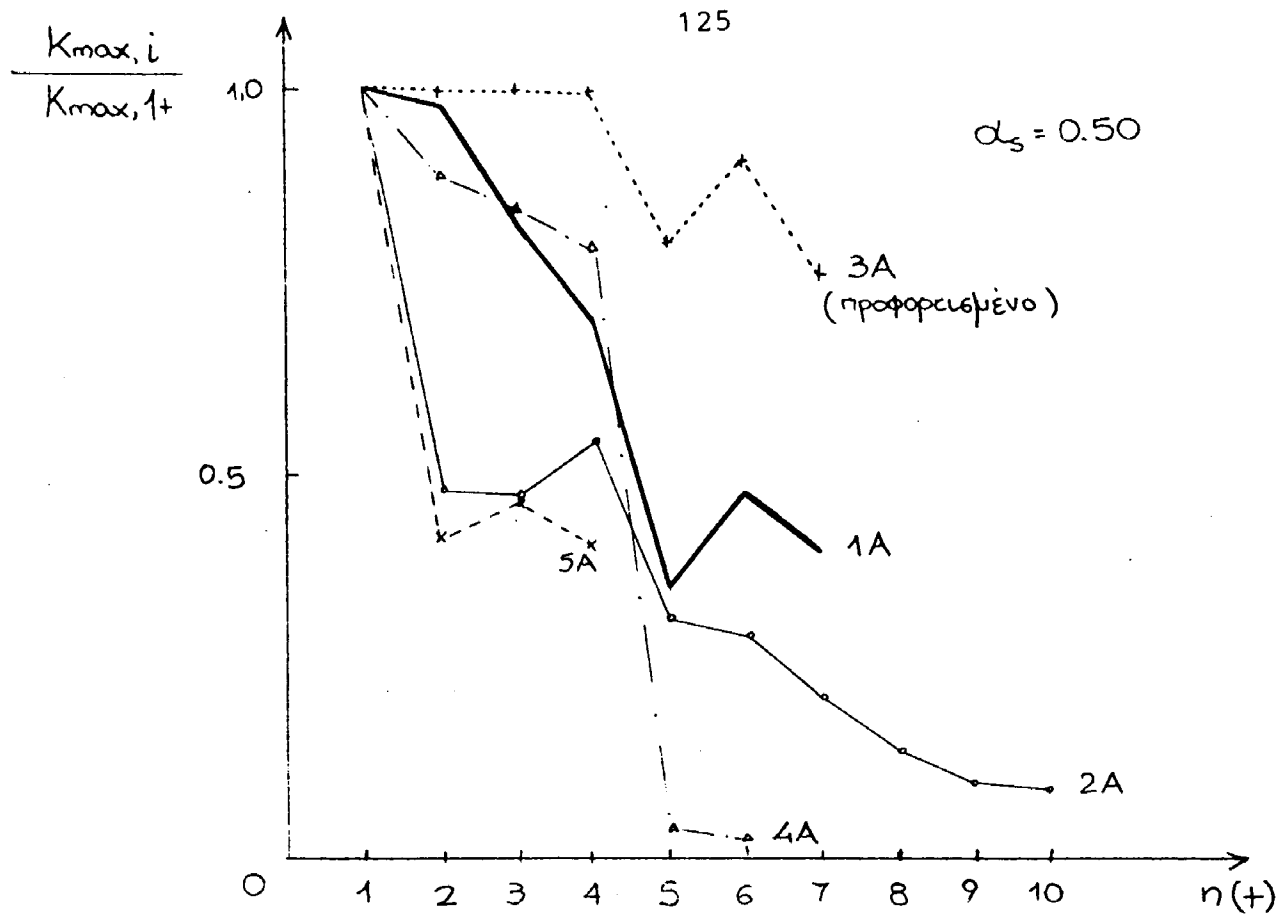
Σχ. 6.6α,β: CB-1,2. Μεταβολή της μέγιστης ακαμψίας συναρτήσει του πλήθους των κύκλων.



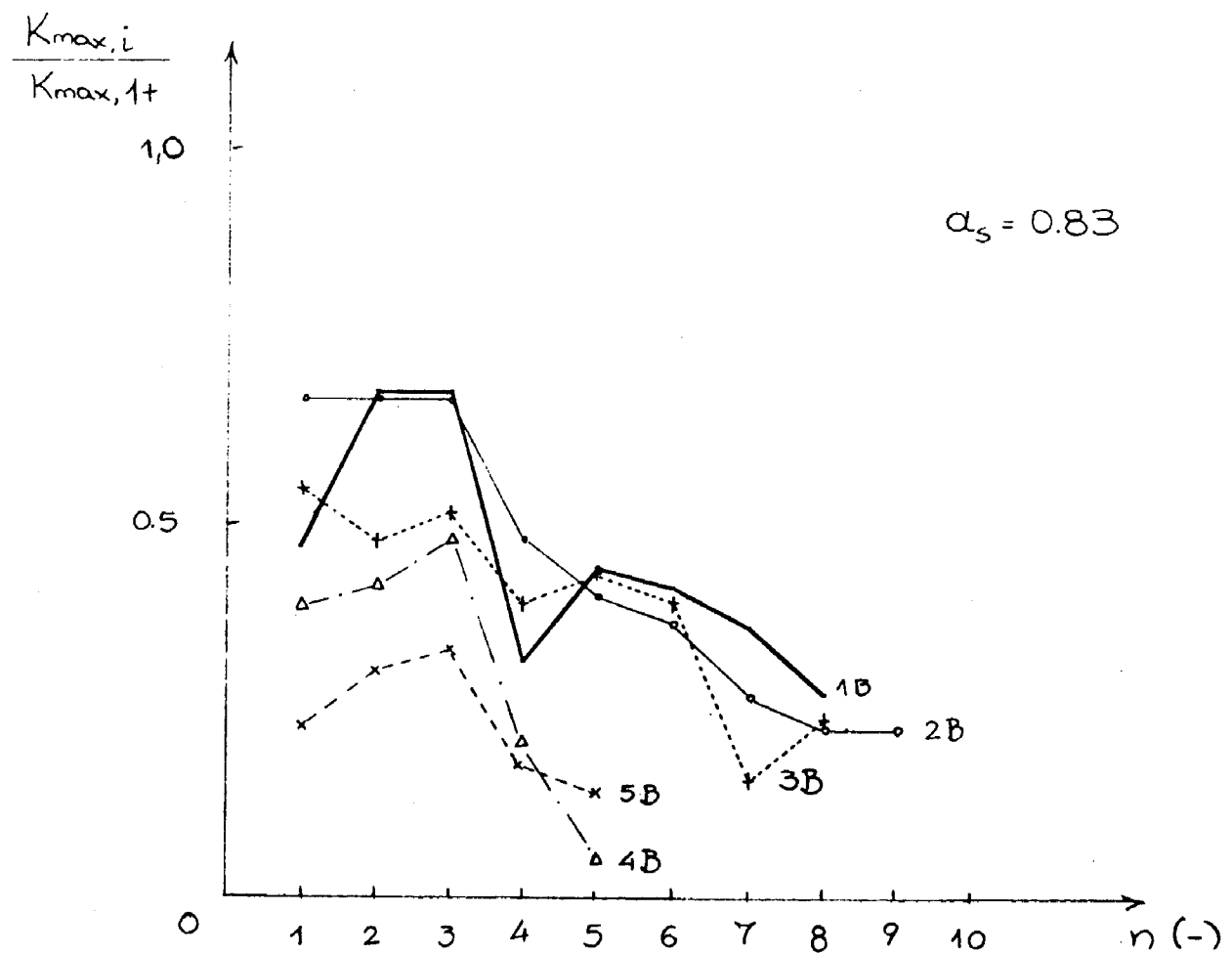
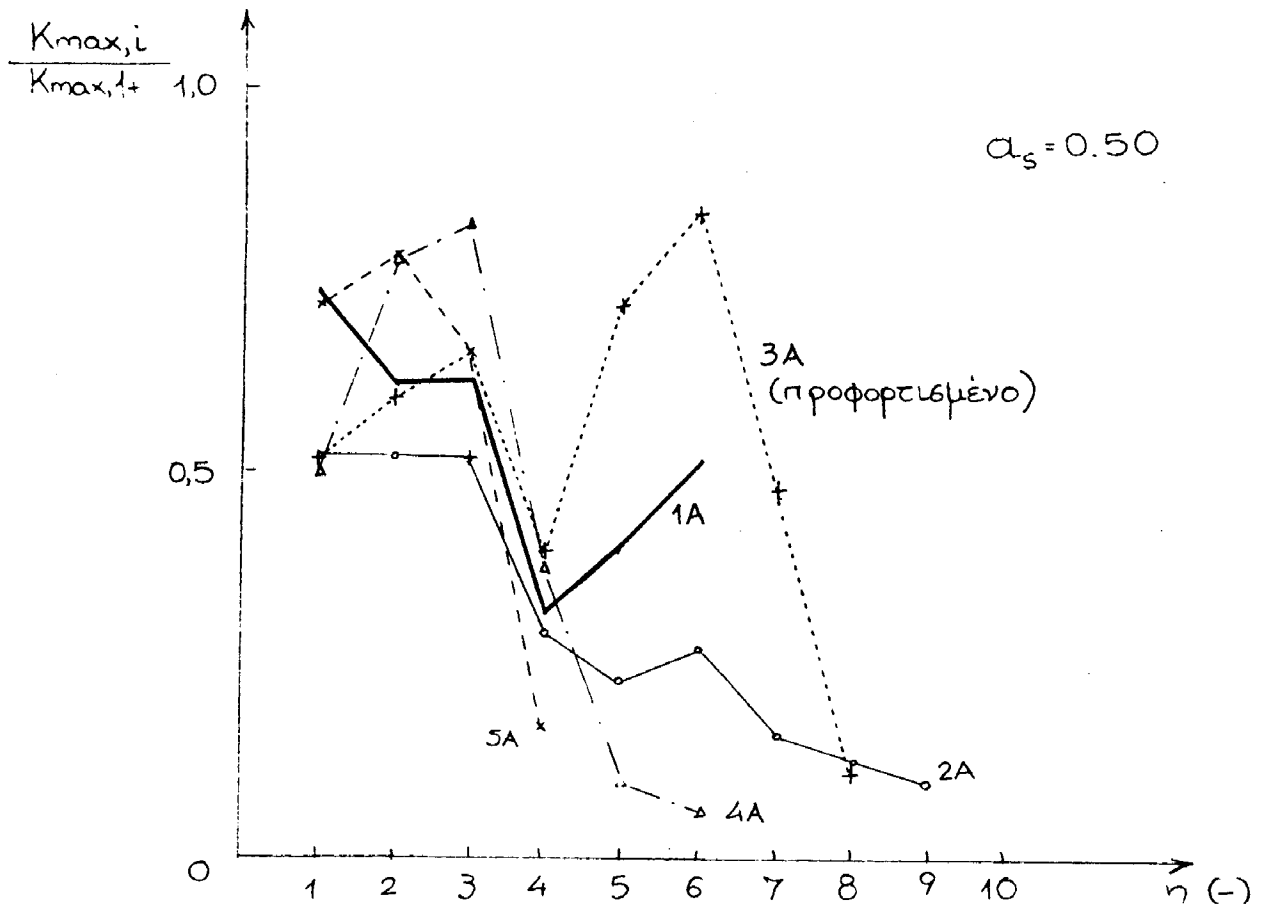
Σχ. 6.6γ,δ: CB-3,4. Μεταβολή της μέγιστης ακαμψίας συναρτήσει του πλήθους των κύκλων.



Σχ. 6.6ε: CB-5. Μεταβολή της μέγιστης ακαμψίας συναρτήσει του πλήθους των κύκλων.



Σχ. 6.7α,β: Μετάβολη της μέγιστης ακαμψίας των δοκιμών κατά τις θετικές ανακυκλίσεις.



Σχ. 6.8α,β: Μεταβολή της μέγιστης ακαμψίας των δοκιμίων κατά τις αρνητικές ανακυκλίσεις.

7. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ

Η πλαστιμότητα είναι ένα καλό κριτήριο για την αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Υπάρχουν όμως δυσκολίες στην εκτίμηση της πλαστιμότητας μίας δεδομένης κατασκευής ή μέλους κατασκευής. Κι αυτό διότι η πλαστιμότητα εξαρτάται απ' τον τρόπο αστοχίας της κατασκευής ή του μέλους που εξετάζεται [12]. Για τον λόγο αυτόν δεν υπάρχει ενιαίο κριτήριο εκτιμήσεως της πλαστιμότητας το οποίο να εφαρμόζεται εξίσου αξιόπιστα σε όλες τις περιπτώσεις [12].

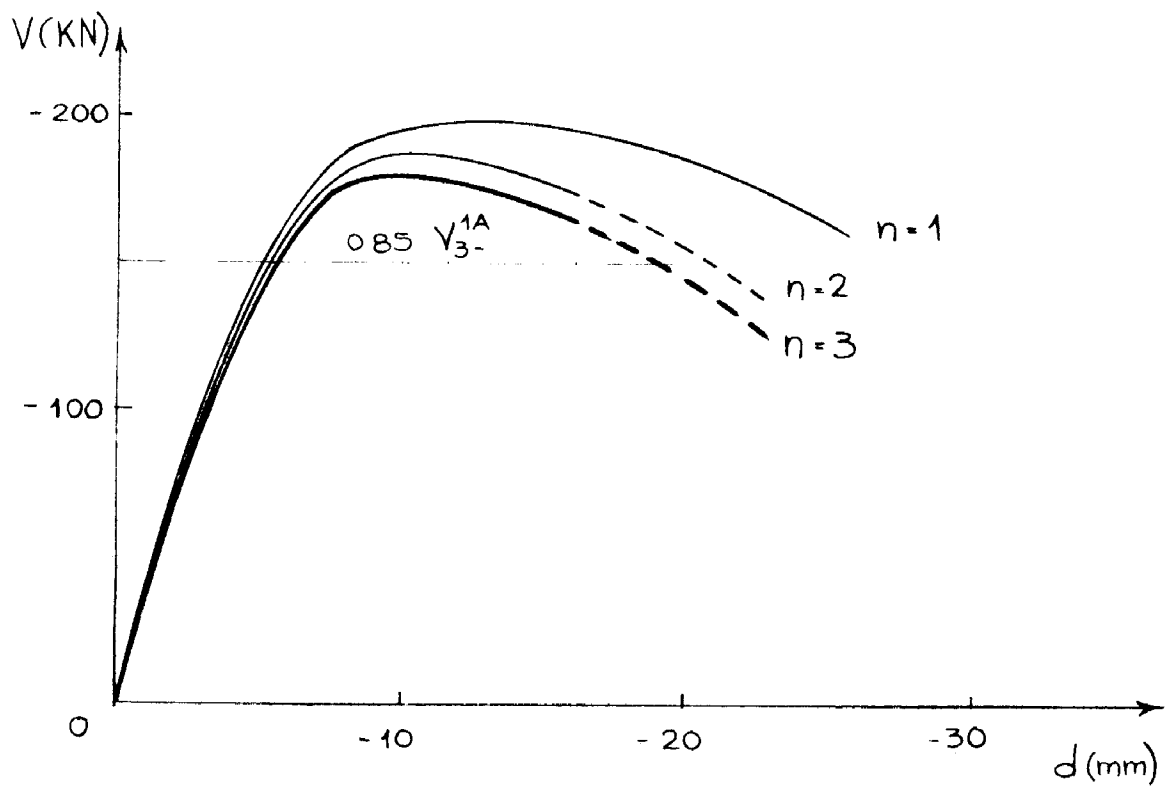
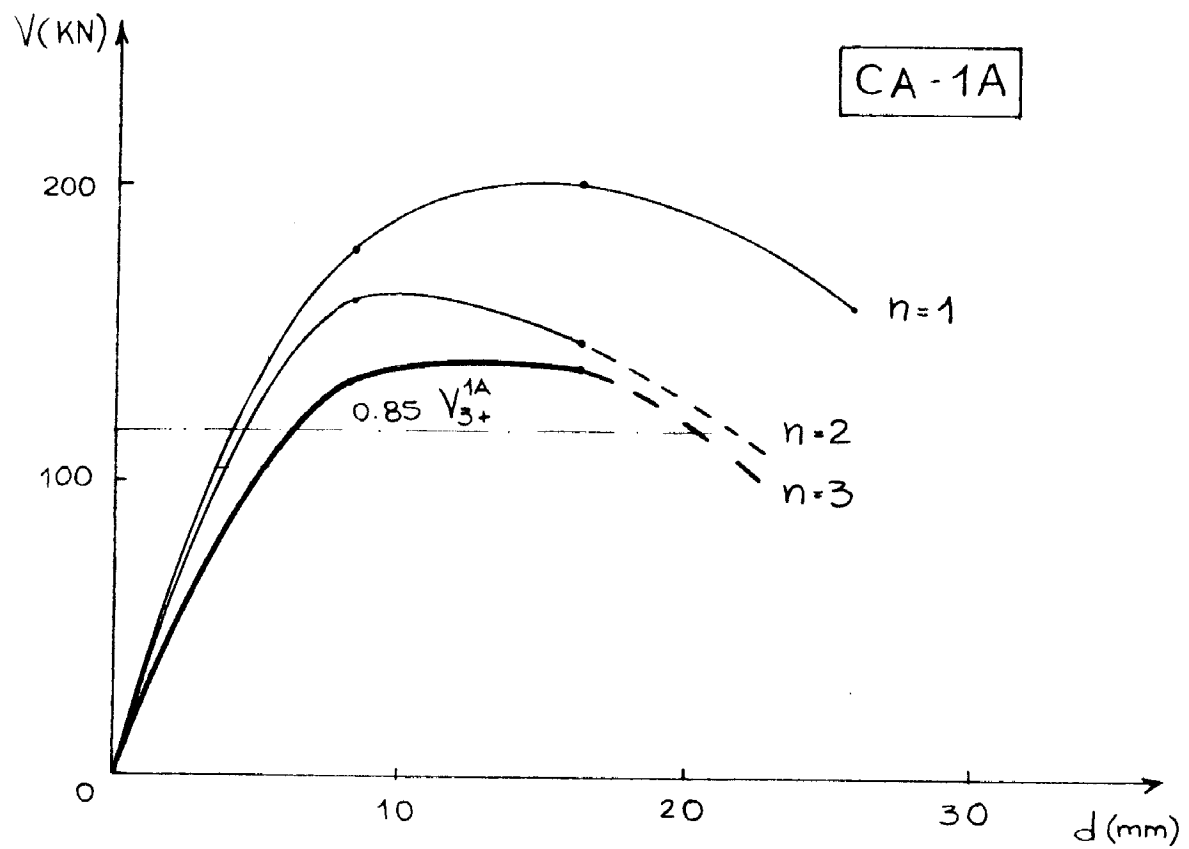
Στα επόμενα εξετάζονται διάφοροι τρόποι εκτιμήσεως της πλαστιμότητας των δοκιμών της παρούσας έρευνας, σχολιάζεται δε η αξιοπιστία-τους.

7.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

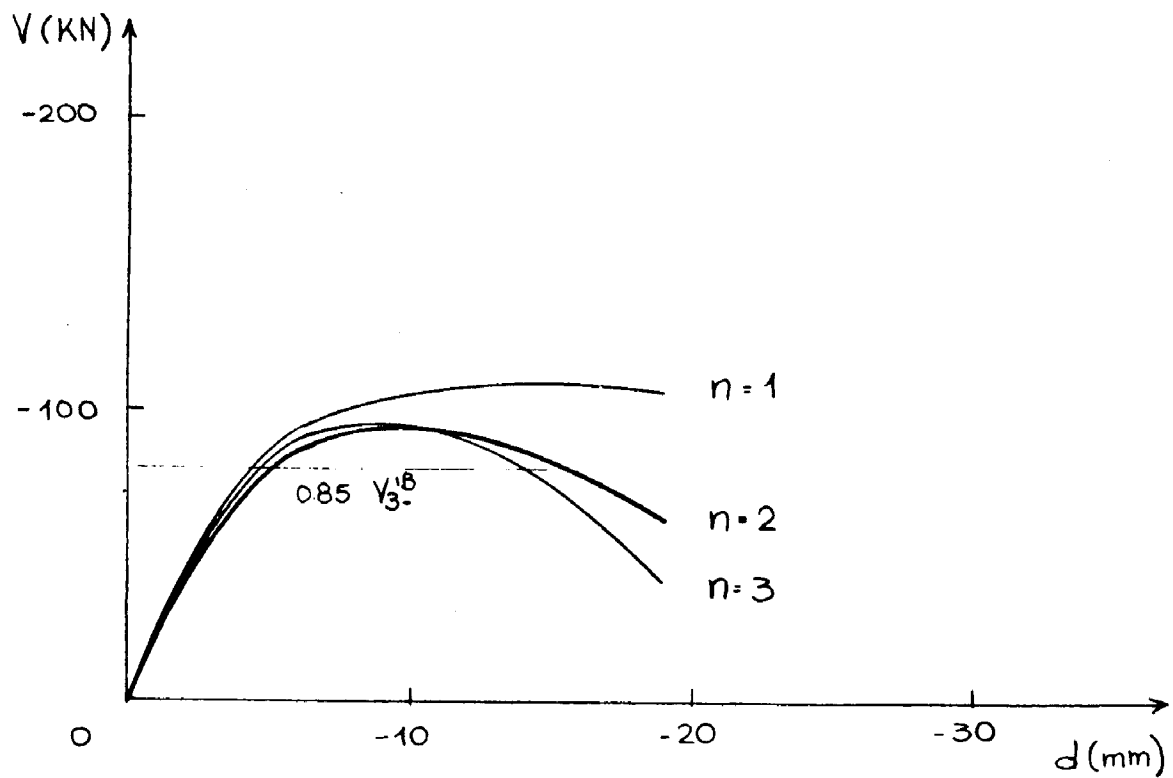
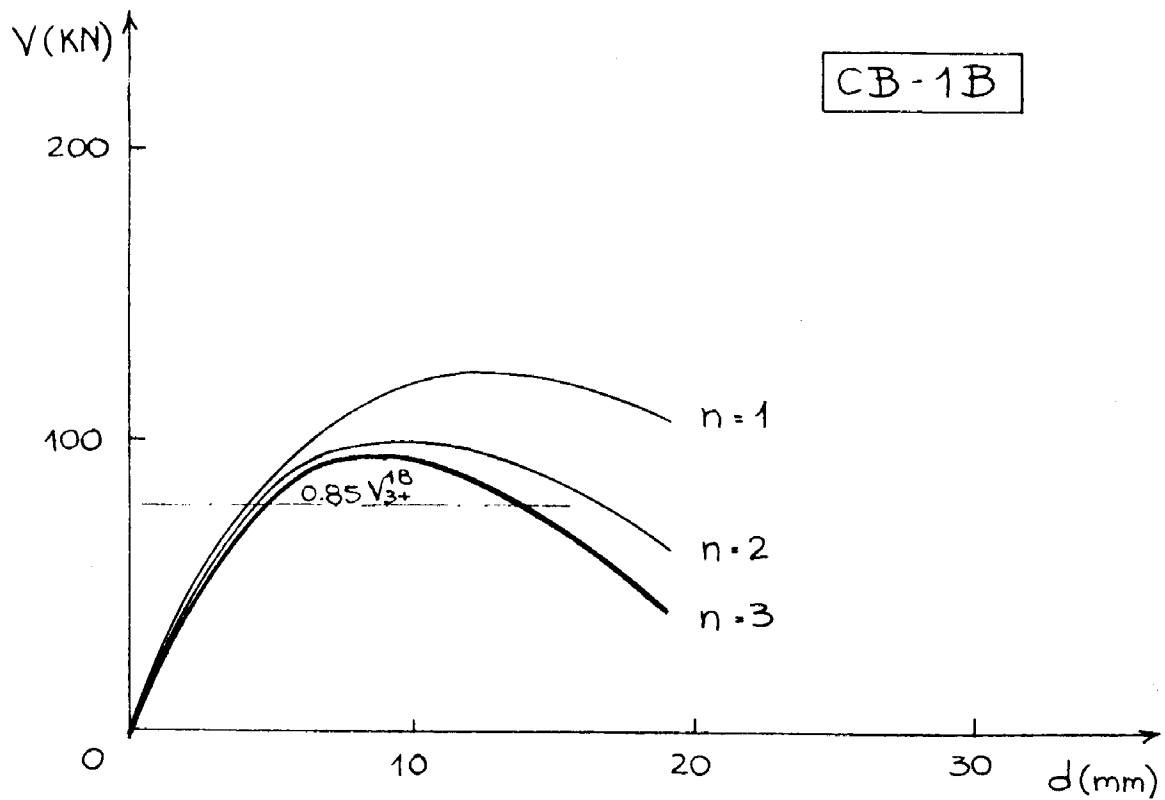
Ο δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων " μ_d " εκφράζει τη δυνατότητα μετελαστικής παραμορφώσεως ενός στοιχείου χωρίς σημαντική μείωση της αποκρίσεώς-του. Εξαρτάται, γενικώς: α) απ' τον λόγο διατμήσεως α_s και β) απ' τον τρόπο οπλίσεως.

Ο δείκτης " μ_d " σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ευρίσκεται απ' το σχήμα της περιβάλλουσας των κύκλων φορτίσεως. Σε περίπτωση που γίνονται περισσότερες από μία ανακυκλίσεις για την ίδια στάθμη επιβαλλόμενης μετακινήσεως πρέπει να καταστεί σαφές ποιών κύκλων η περιβάλλουσα θα λαμβάνεται υπόψη. Απαιτείται να οριοθεί και ένα "αποδεκτό" ποσοστό μειώσεως της αποκρίσεως κατά την μετελαστική μετακίνηση (περιθώρια ανακατανομής εντάσεως).

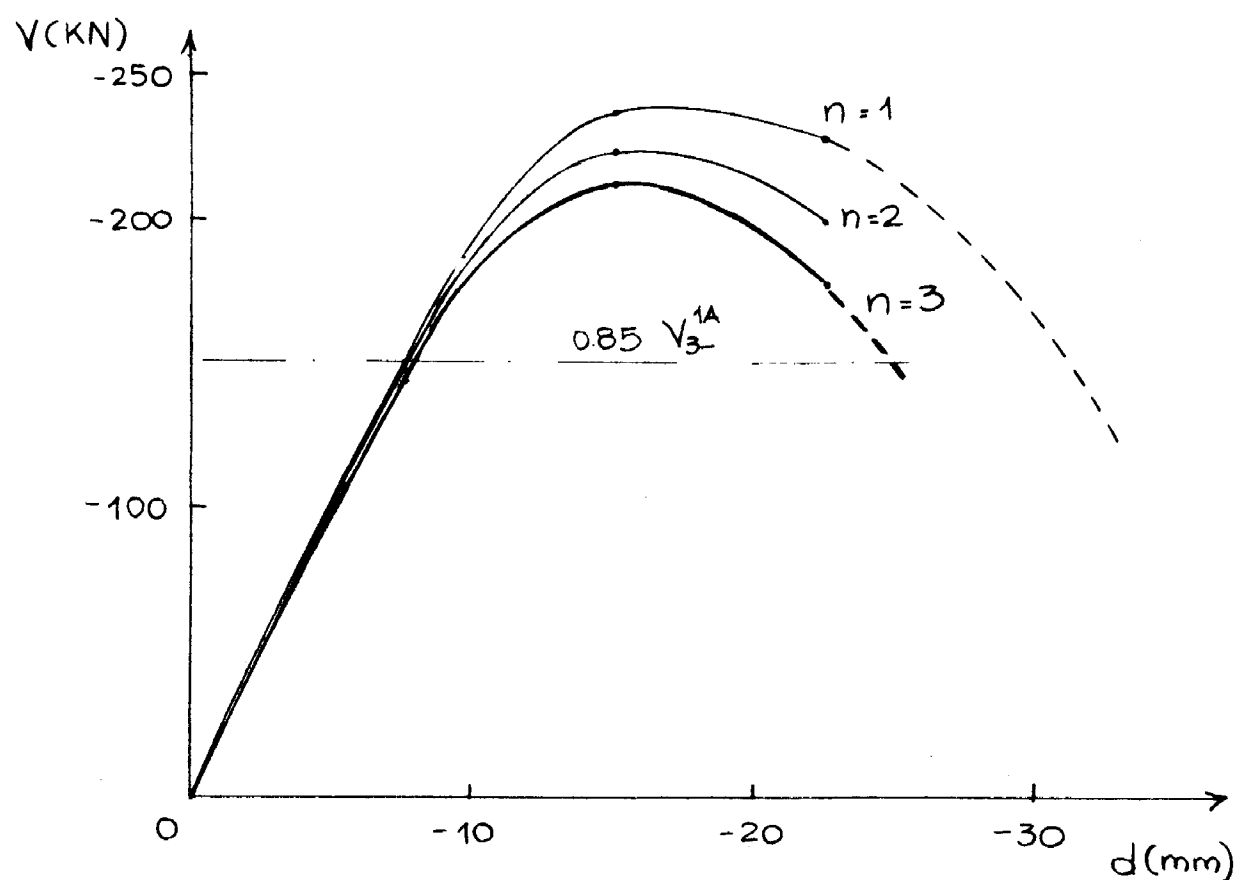
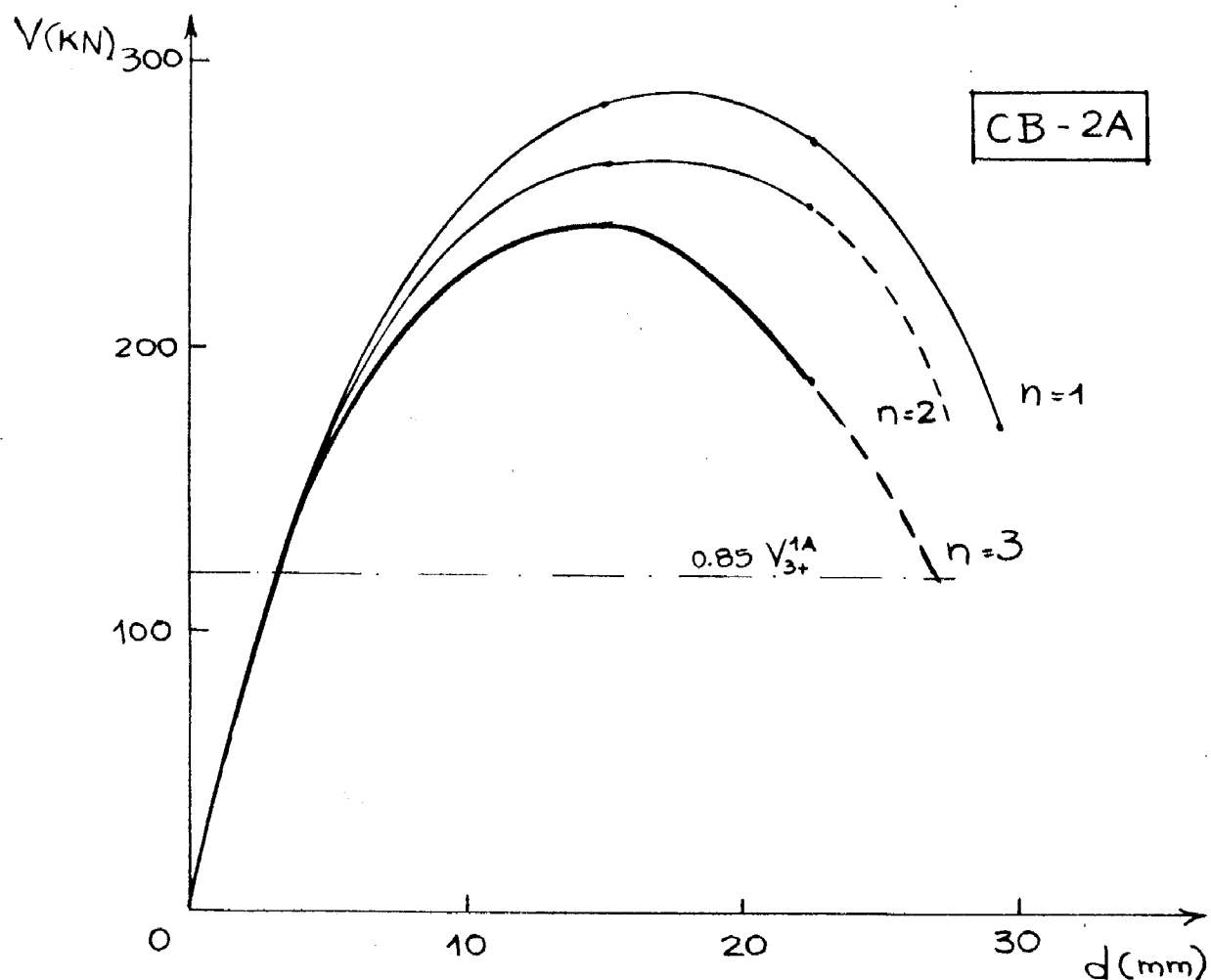
Ενδεικτικώς αναφέρεται ότι στον κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας, μία κατασκευή θεωρείται πλάσιμη εάν όταν υποβάλλεται σε μετακίνηση 4-πλάσια της διαρροής για 4 τουλάχιστον πλήρεις ανακυκλίσεις, εμφανίζει πτώση αποκρίσεως μικρότερη ή ίση του 20%. Σήμερα, πάντως, οι παραπάνω απαιτήσεις θεωρούνται μάλλον υπερβολικές.



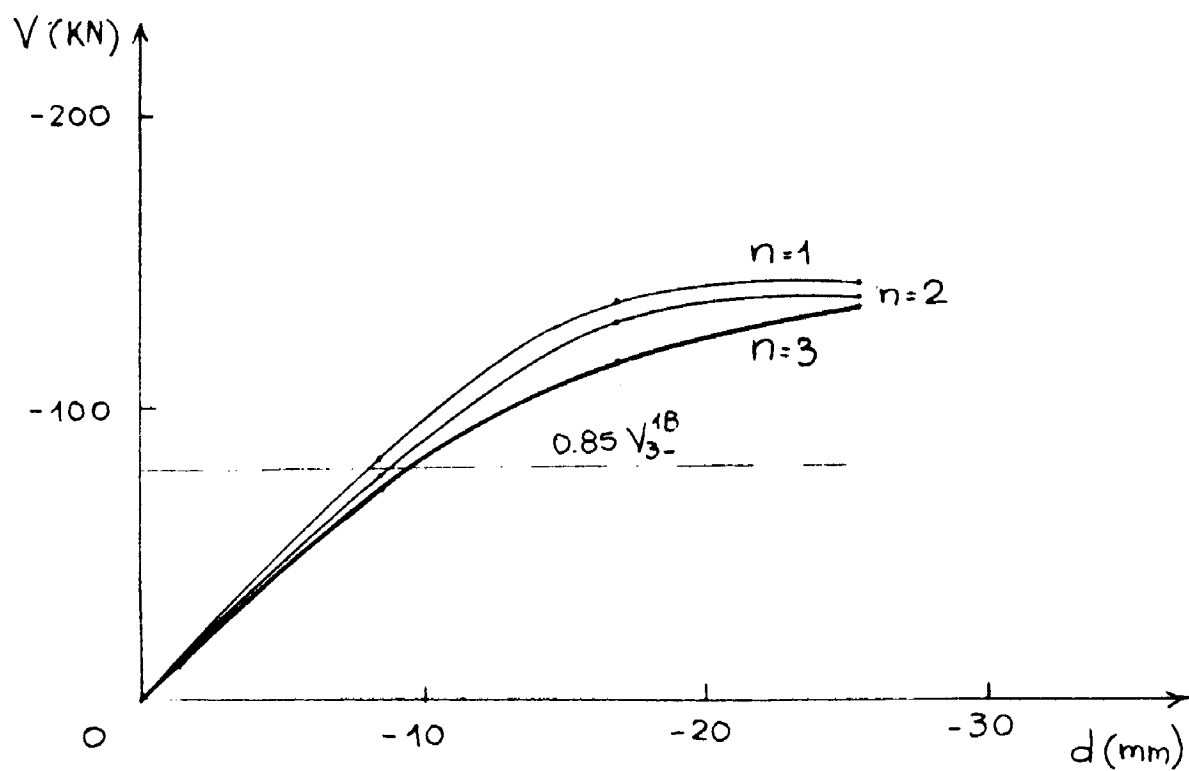
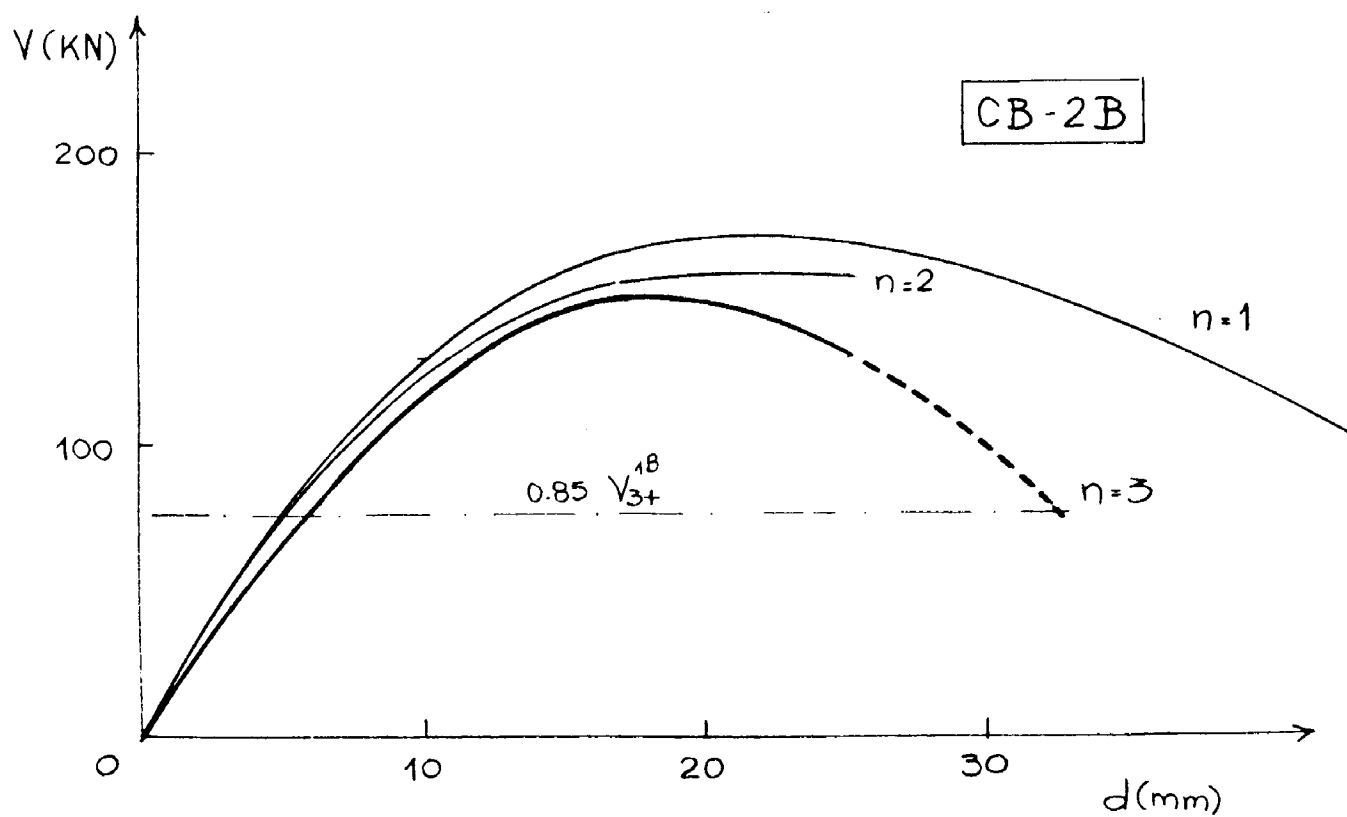
Σχ. 7.1α CB-1A - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



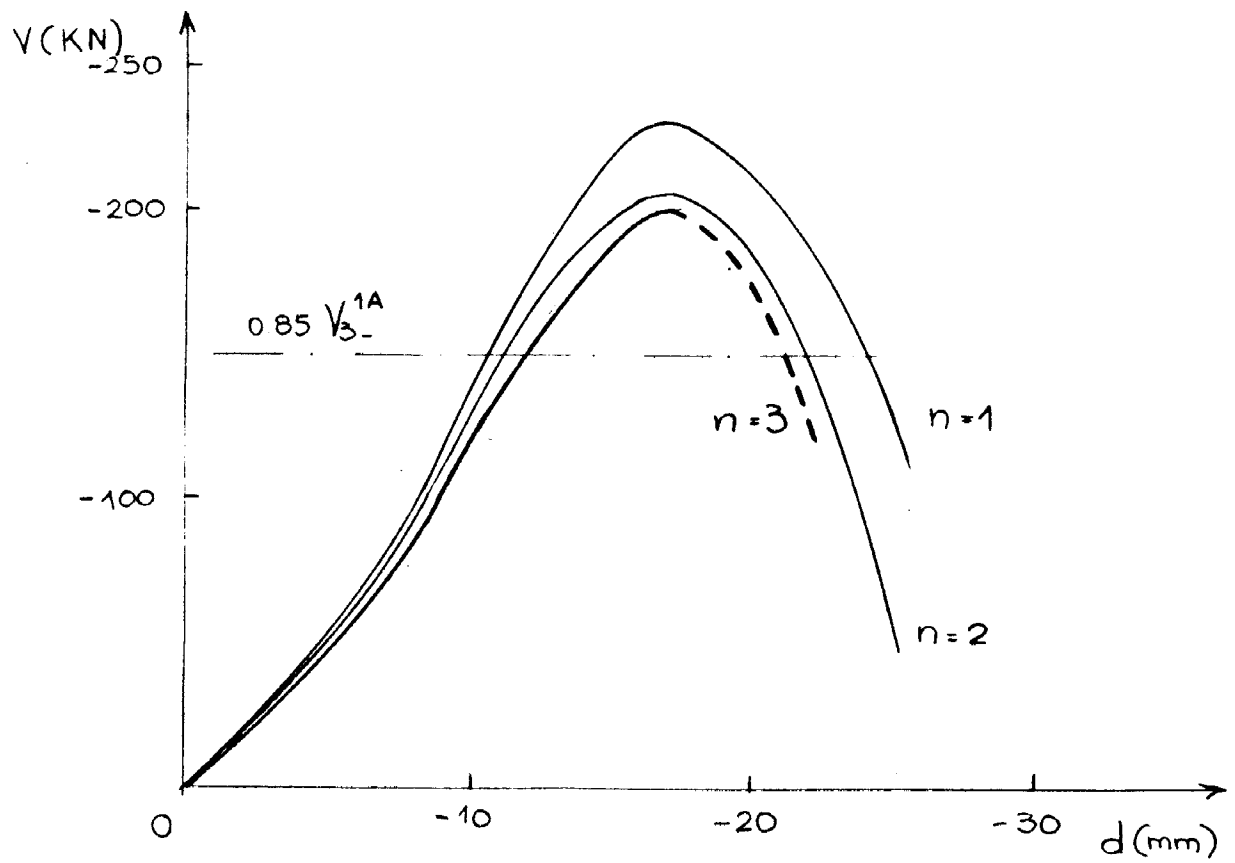
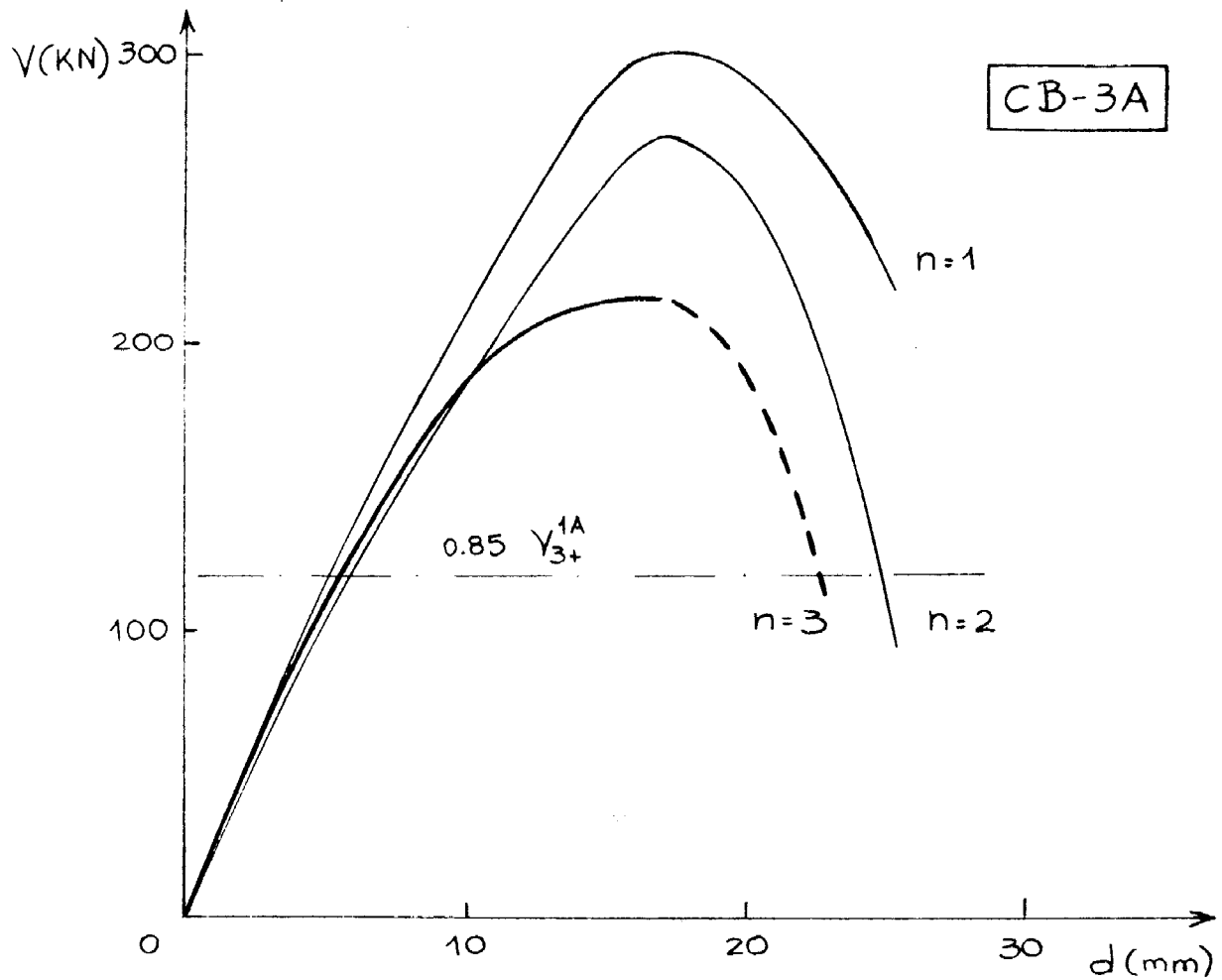
Σχ. 7.1β CB-1B - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



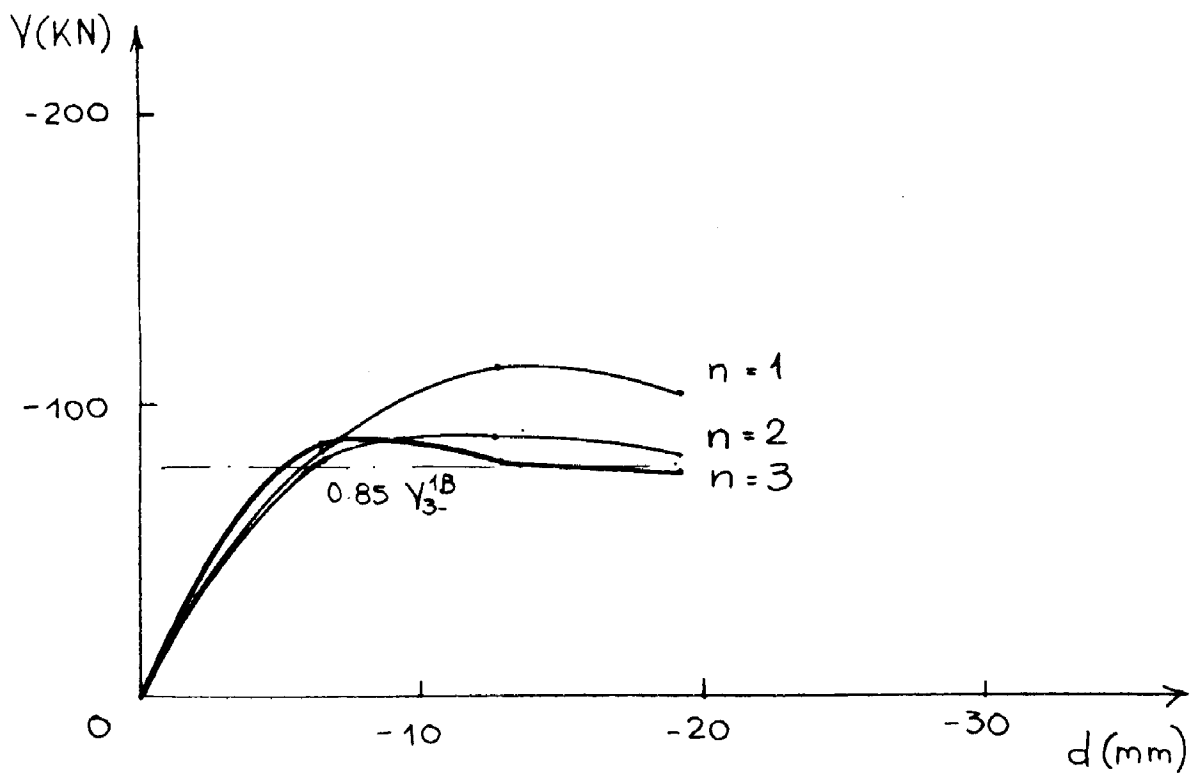
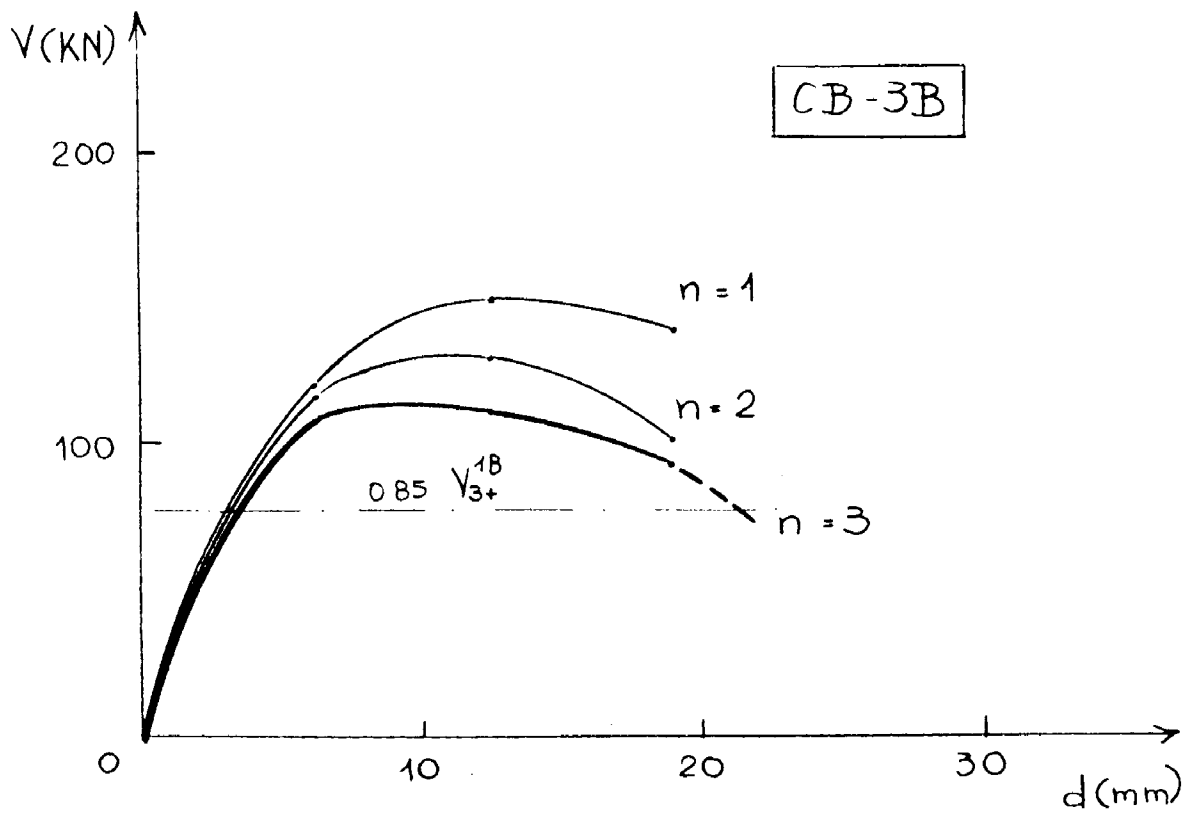
Σχ. 7.2α CB-2A - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



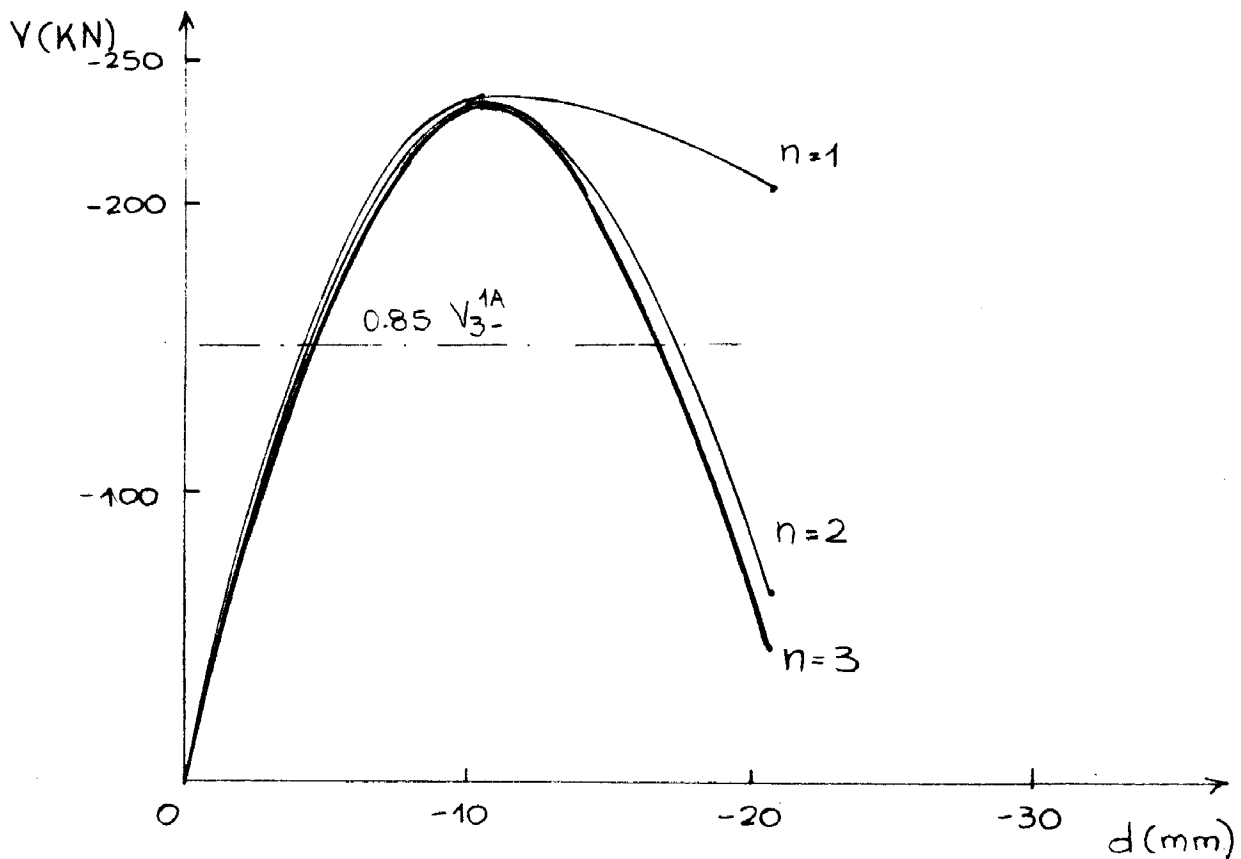
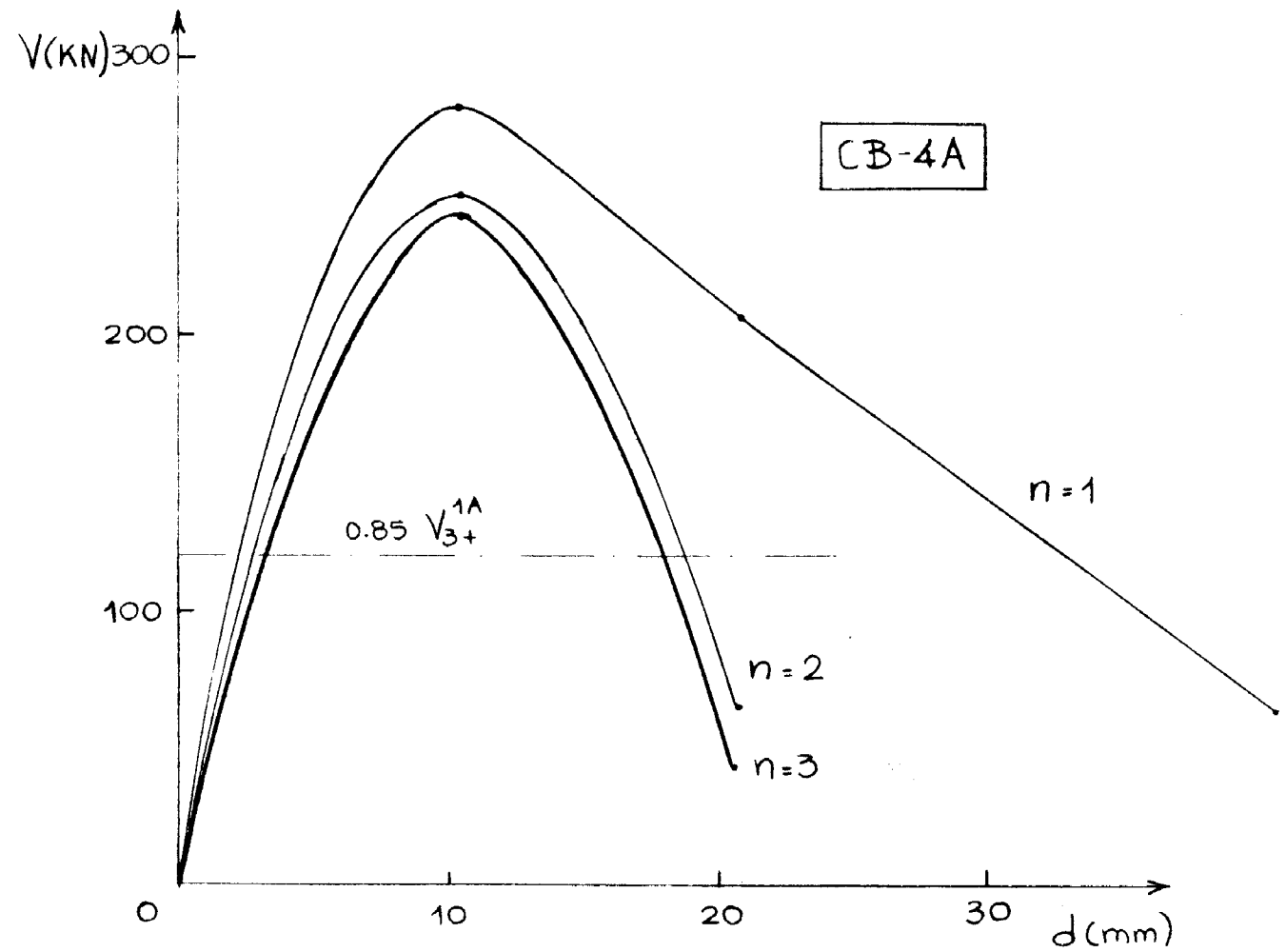
Σχ. 7.2β CB-2B - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



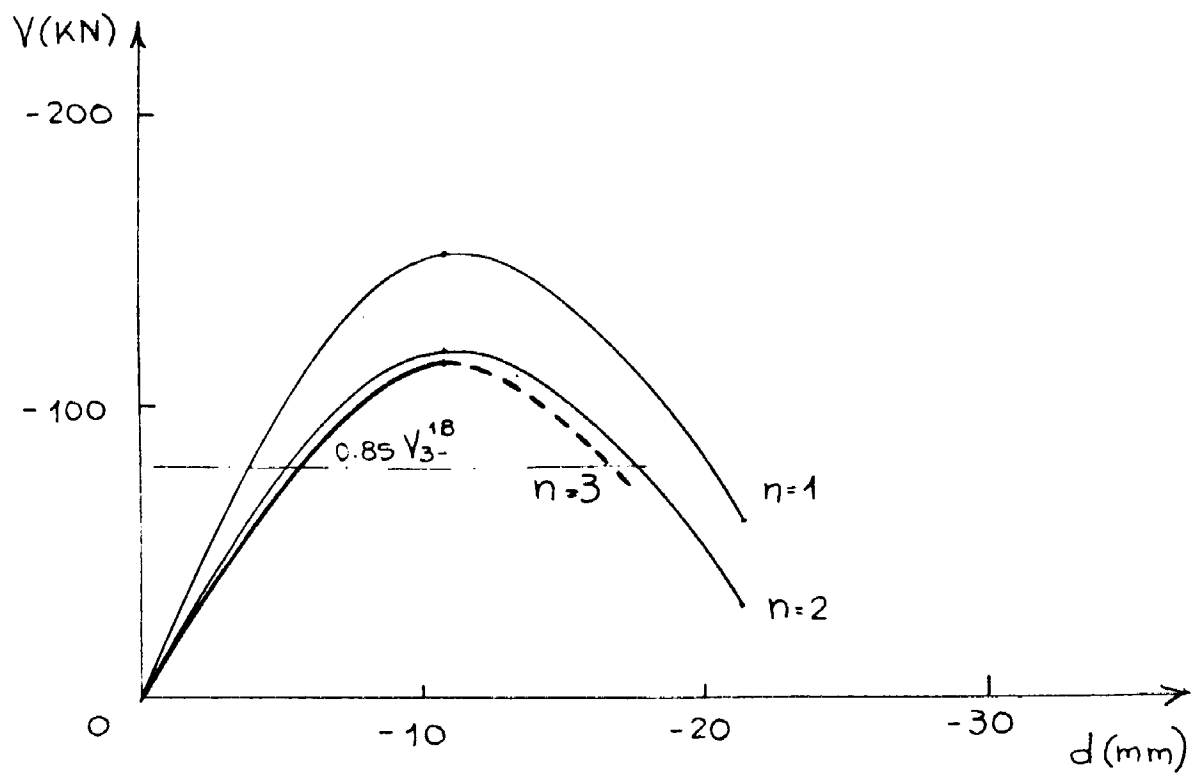
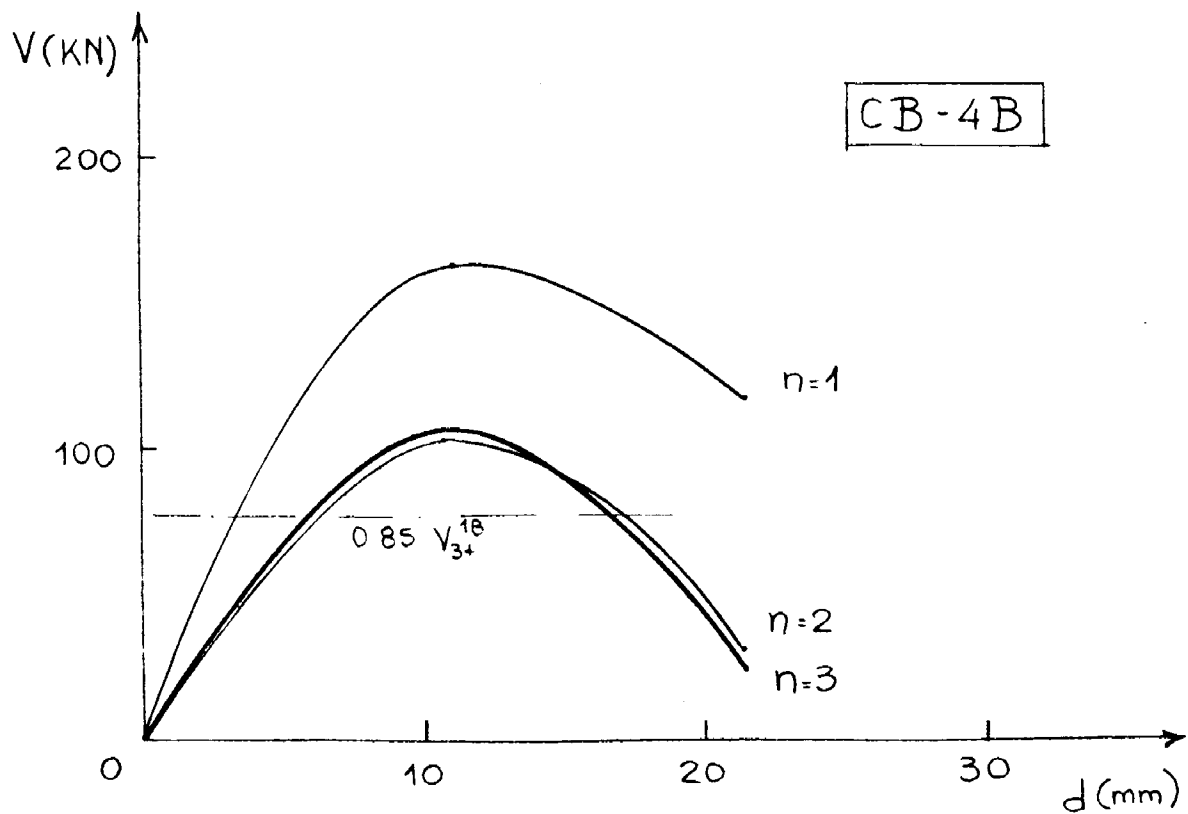
Σχ. 7.3α CB-3A - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



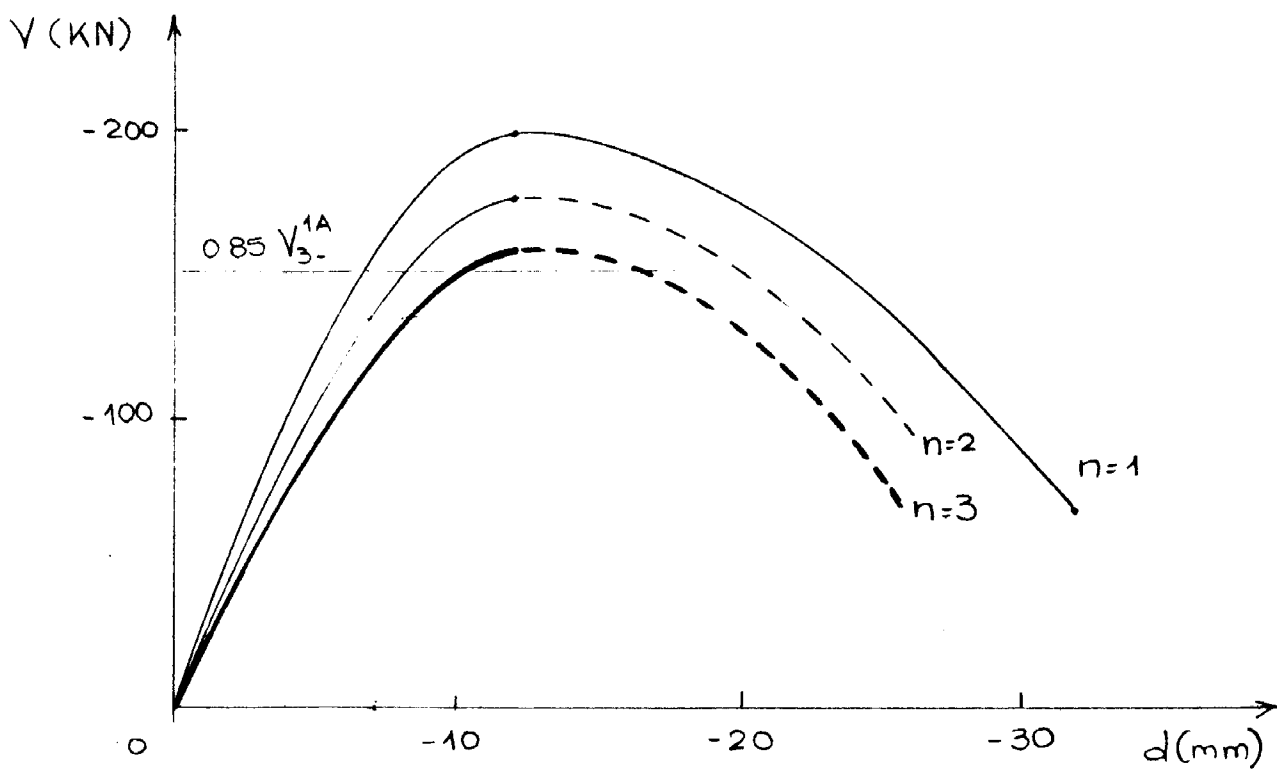
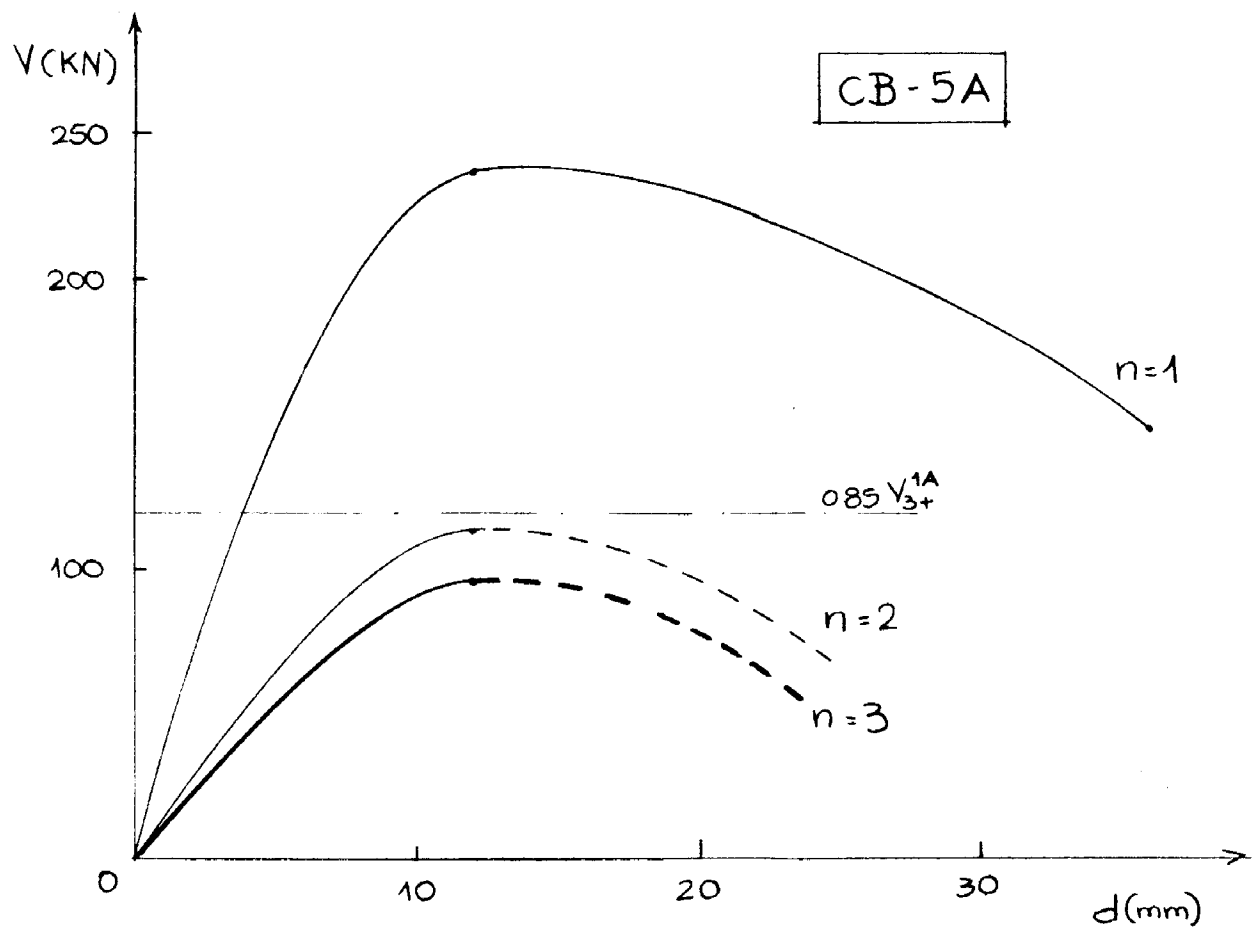
Σχ. 7.3β CB-3B - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



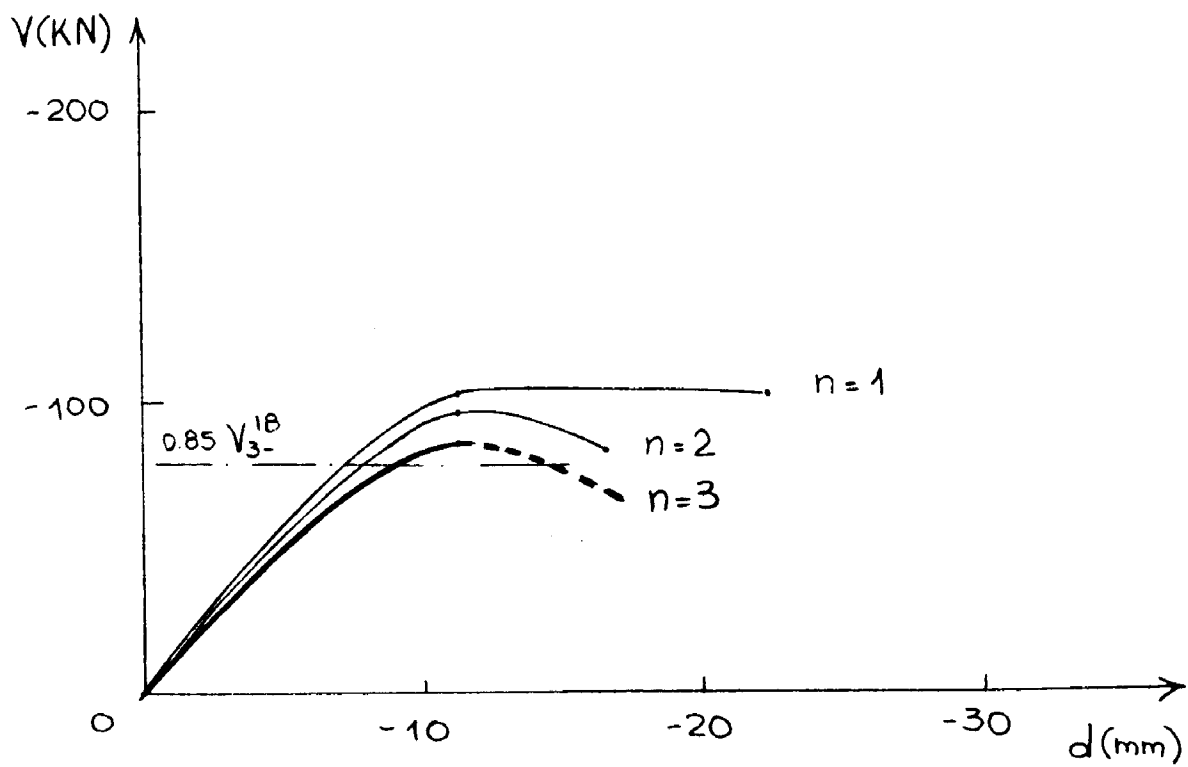
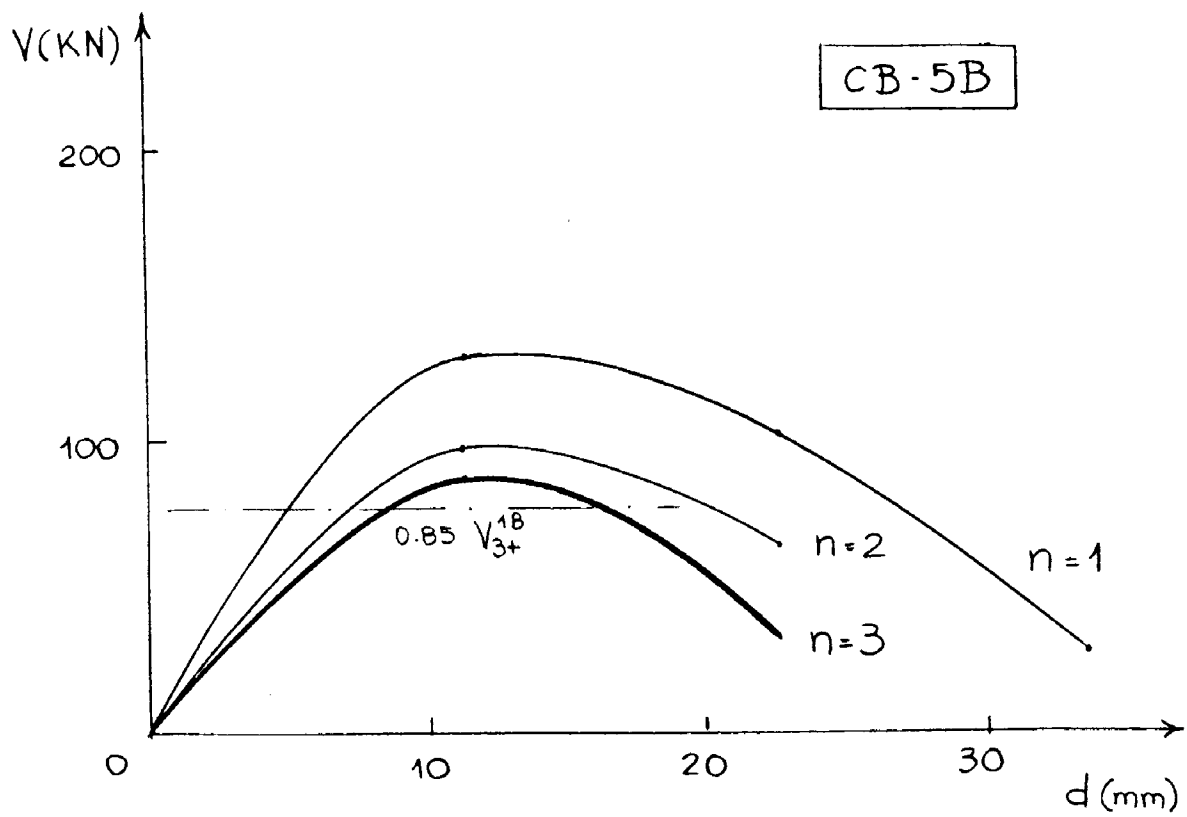
Σχ. 7.4α CB-4A - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



Σχ. 7.4β CB-4B - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



Εχ. 7.5α CB-5A - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.



Σχ. 7.5β CB-5B - Περιβάλλουσες των κύκλων $n = 1, 2, 3$ για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.

Για τον καθορισμό των " μ_d " των δοκών συζεύξεως της έρευνας αυτής, αναζητήθηκε κάποιος ενιαίος τρόπος υπολογισμού για όλα τα δοκίμια δεδομένου ότι η μετακίνηση που οδηγεί σε διαρροή ($\delta_y = \delta_1$) καθώς και οι μέγιστες τέμνουσες διαφέρουν στο κάθε δοκίμιο (διαφορετικοί τρόποι οπλίσεως).

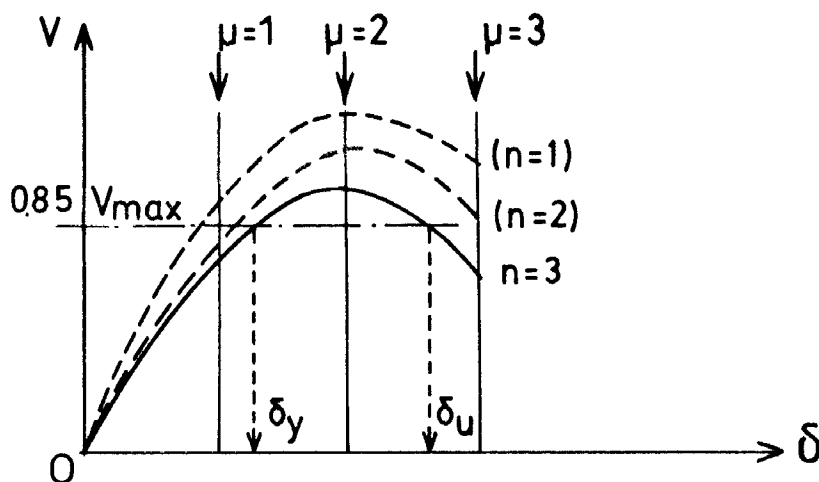
Θεωρήθηκε ότι η περιβάλλουσα των τρίτων κύκλων ($n = 3$) είναι αντιπροσωπευτική της πτώσεως αποκρίσεως λόγω ανακυκλίσεων, ο δε δείκτης " μ_d " υπολογίστηκε για παραμένουσα απόκριση: $0.85 V_{max}$ (δηλαδή για μείωση αποκρίσεως 15%).

Ως V_{max} επιλέγεται η μέγιστη V για $n = 3$ της κλασικώς οπλισμένης δοκού (CB-1A,B) η οποία είναι κοινή για όλα τα δοκίμια με ίδιο λόγο διατμήσεως.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Για το κάθε δοκίμιο σχεδιάζεται η περιβάλλουσα $n = 3$ των τρίτων κύκλων φορτίσεως, χωριστά για την κάθε διεύθυνση φορτίσεως - βλ. Σχ. 7.1-7.5 - (Στα σχήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί για εποπτεία οι περιβάλλουσες καί των τριών κύκλων φορτίσεως).

Ο δείκτης μ_d υπολογίζεται όπως φαίνεται στο Σχ. 7.6. Προκύπτει δε απ' τον μέσον όρο των " μ_d " για τις δύο κατευθύνσεις φορτίσεως.

Στην περίπτωση του δοκ. CB-2B, όπου λόγω της μορφής της περιβάλλουσας $n = 3$ δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του $\mu_d(-)$ (Σχ. 7.2β) λαμβάνεται ως " μ_d " ο δείκτης που αντιστοιχεί στην περιβάλλουσα των θετικών κύκλων.













$$\mu_d = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Σχ. 7.6: Τρόπος υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας ανακυκλιζόμενων μετακινήσεων.

Ως μετακίνηση δ_y επελέγη η μετακίνηση που αντιστοιχεί στην περιβάλλουσα $n = 3$ και όχι η δ_y ($n = 1$) η οποία θα ήταν πλησιέστερα στην πραγματική μετακίνηση διαρροής ($\delta = \delta_1$). Αυτό έγινε διότι η χρήση των δ_y ($n = 1$) δίνει αυξημένους μ_d στην περίπτωση δοκιμών με μεγάλη διαφορά αποκρίσεως μεταξύ 1ου και 3ου κύκλου (ένδειξη κακής συμπεριφοράς) και όχι στα δοκίμια με σταθερή απόκριση - $\delta(n = 1) - \delta(n = 3) -$.

Στον Πίνακα 7.1 φαίνονται οι τιμές του δείκτη μ_d που υπολογίστηκαν με την μεθοδολογία που αναφέρθηκε.

Πίνακας 7.1. Δείκτες πλαστιμότητας μετακινήσεων μ_d .

α_s	α/α	Τρόπος οπλισσεως	μ_d
0.50	1A		3,1
	2A		5,6
	3A		2,8
	4A		4,6
	5A		1,6
0.83	1B		2,9
	2B		5,2
	3B		4,1
	4B		2.7
	5B		1.6

Απ' τις τιμές του Πίνακα 7.1 παρατηρούμε ότι για $\alpha_s = 0.50$ η δοκός 4A με βλήτρα σε όλο το μήκος-της παρουσιάζει $\mu_d = 4.6$ ενώ η δοκός 3A με τους χιαστί οπλισμούς έχει μόνον $\mu_d = 2.8$. Τούτο θα εσήμαινε ότι η δοκός 4A συμπεριφέρεται πιο πλαστικά απ' την δοκό 3A. Τόσο όμως απ' τις μορφολογίες ρηγματώσεως, απ'

τις καμπύλες V-δ, αλλά και απ' τη μείωση της αποκρίσεως και της ακαμψίας λόγω ανακυκλώσεων (πρβλ. § 3,4,5,6) είναι προφανές ότι η συμπεριφορά της δοκού 4A είναι πολύ χειρότερη απ' την αντίστοιχη της 3A.

Επίσης, απ' τις τιμές των μ_d που υπολογίστηκαν δεν φαίνεται ότι για $\alpha_s = 0.50$ η δοκός 3A συμπεριφέρθηκε πολύ καλύτερα απ' την 1A, ενώ για $\alpha_s = 0.83$ ότι η συμπεριφορά των δοκών 3B και 1B ήταν παρόμοια, όπως διαπιστώθηκε πειραματικά.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων " μ_d " δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικός της πραγματικής συμπεριφοράς των δοκών συζεύξεως που εξετάστηκαν.

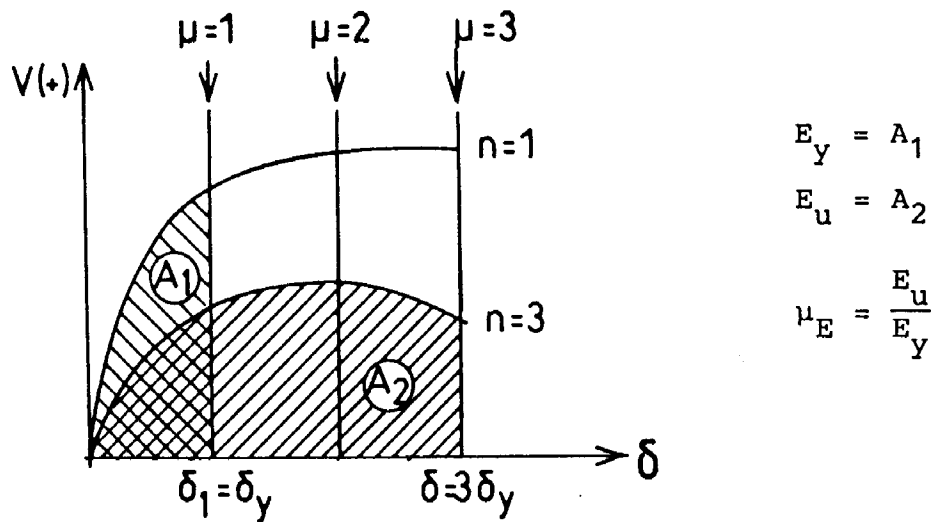
7.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΡΟΥΣ "ΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ" ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι δείκτες πλαστιμότητας μετακινήσεων " μ_d " της 7.1 δεν είναι αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς των δοκιμών διότι, κατά τον υπολογισμό-τους δεν λαμβάνονται υπόψη καθοριστικοί παράγοντες της συμπεριφοράς του κάθε δοκιμίου, όπως: 1) Η μείωση αποκρίσεως λόγω ανακυκλώσεων, 2) Τα φορτία στην κάθε στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων.

Με σκοπό να ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράγοντες γίνεται μια προσπάθεια εκτιμήσεως του δείκτη πλαστιμότητας των δοκών συζεύξεως σε όρους "αναλίσκόμενης" ενέργειας. Ακολουθείται μια μεθοδολογία που είχε χρησιμοποιηθεί από Ιάπωνες ερευνητές [12], η οποία όμως τροποποιήθηκε για να προσαρμοστεί καλύτερα στα πειραματικά-μας αποτελέσματα.

Ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους αναλίσκόμενης ενέργειας, έστω " μ_E ", προσδιορίζεται μέσω των περιβαλλουσών των θετικών κύκλων φορτίσεως, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.7. Η "αναλίσκόμενη" ενέργεια εκφράζεται απ' το εμβαδόν που περικλείεται από τις περιβάλλουσες φορτίσεως. (Η ενέργεια αυτή διαφέρει απ' την συνήθως ονομαζόμενη "αναλίσκόμενη ενέργεια" - dissipated energy - και η οποία εκφράζεται απ' το εμβαδόν των βρόχων υστερήσεως - πρβλ. §8 -).

Ως "ενέργεια διαρροής E_y " λαμβάνεται το εμβαδόν A_1 που περικλείεται απ' την περιβάλλουσα $n = 1$ έως την μετακίνηση $\delta = \delta_y$ ($\mu = 1$), ενώ ως "ενέργεια αστοχίας E_u " λαμβάνεται το εμβαδόν A_2 που περικλείεται απ' την περιβάλλουσα των τρίτων κύκλων ($n = 3$) έως την μετακίνηση $\delta = 3\delta_y$ ($\mu = 3$). Στα δοκίμια που αστόχησαν για $\mu = 2$, το A_2 υπολογίζεται έως την μετακίνηση $\delta = 2\delta_y$.




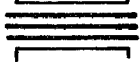



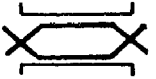
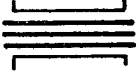



Σχ. 7.7: Τρόπος υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους "αναλισκόμενης" ενέργειας, σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φορτίσεως.

Οι τιμές του " μ_E " των δοκών συζεύξεως της έρευνας αυτής υπολογίστηκαν βάσει των Σχ. 7.1-7.5 και φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

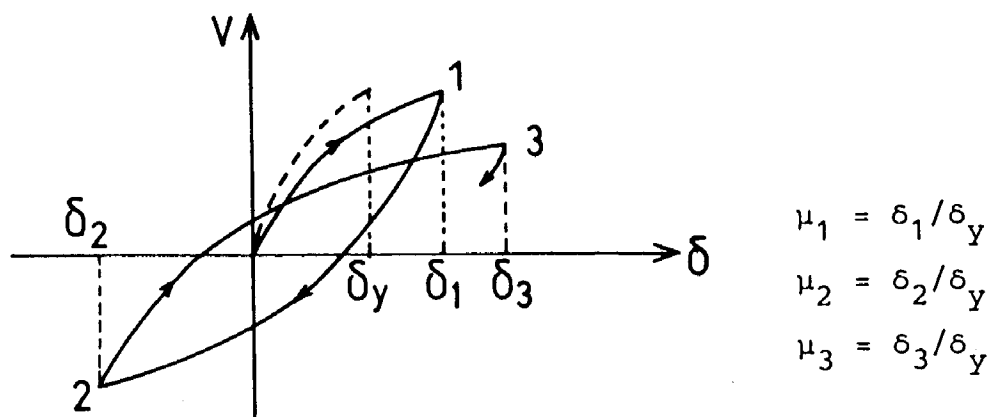
Παρατηρείται ότι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκιμών βάσει των δεικτών μ_E συμβαδίζει απολύτως με τα πειραματικά συμπεράσματα.

Πίνακας 7.2: Δείκτες πλαστιμότητας μ_E σε όρους αναλισκόμενης ενέργειας.

α_s	α/α	Τρόπος οπλισσεως	μ_E
0.50	1A		2.10
	2A		4.72
	3A		2.90
	4A		1.85
	5A		0.40
0.83	1B		3.70
	2B		5.75
	3B		3.85
	4B		1.30
	5B		1.55

7.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο δείκτης αθροιστικής πλαστιμότητας μετακινήσεων (cumulative displacement ductility) για την αποτίμηση της συμπεριφοράς δοκών συζεύξεως χρησιμοποιείται απ' τον Paulay [9]. Καθορίζεται όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8.

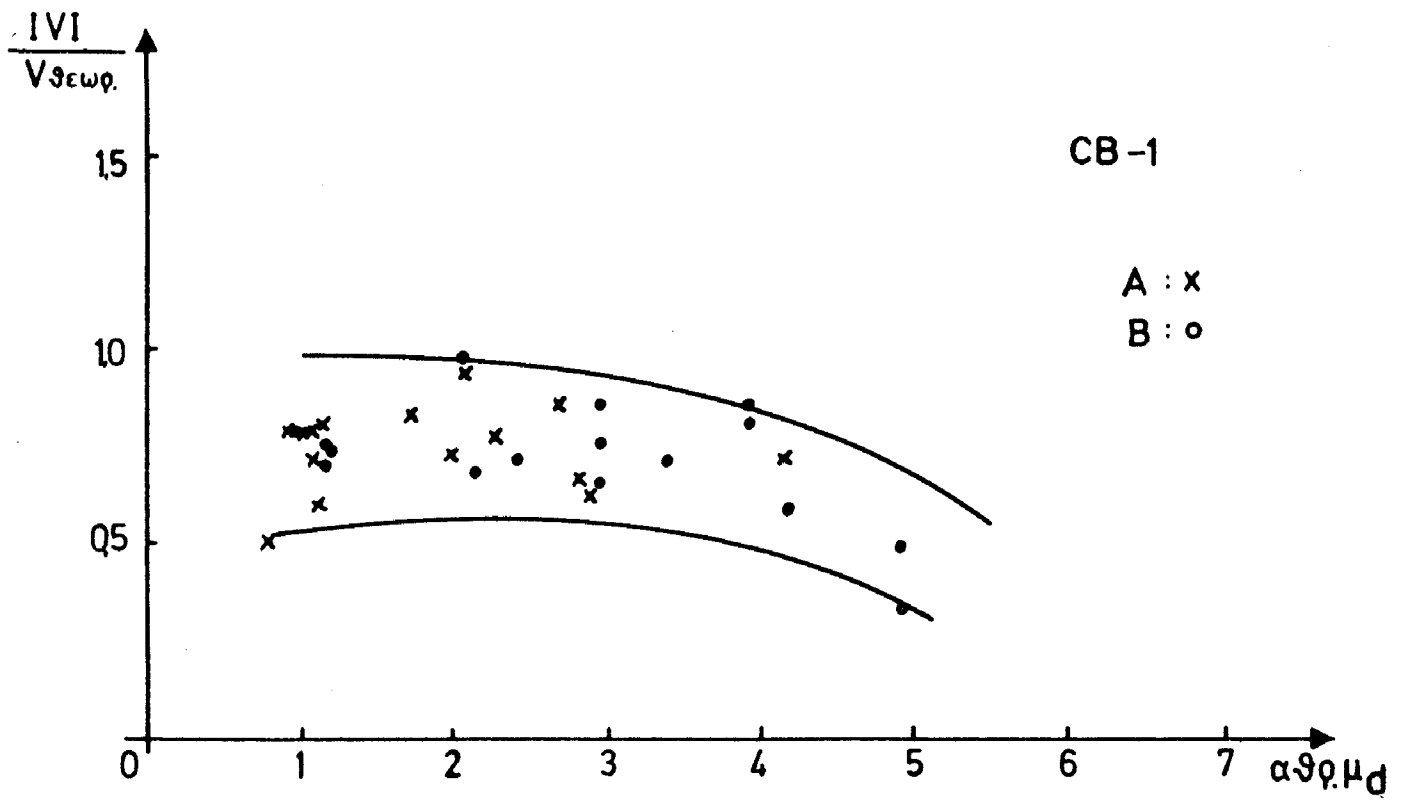


Σχ. 7.8: Ενδεικτικός τρόπος υπολογισμού του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας μετακινήσεων.

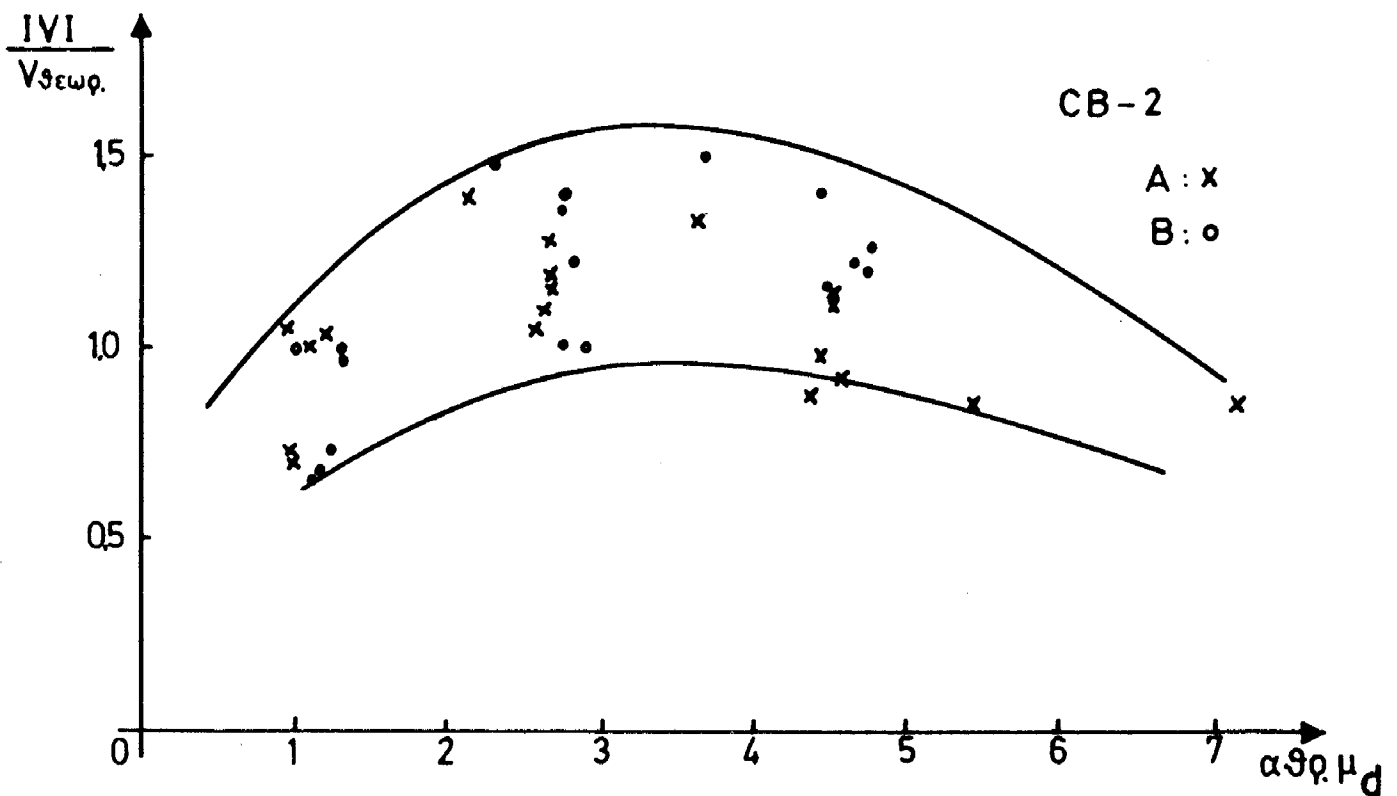
Στα επόμενα χρησιμοποιείται για τον δείκτη αυτόν ο ίδιος συμβολισμός με του κανονικού δείκτη πλαστιμότητας: μ_d . Θα ονομάζεται, όμως: αθροιστικός μ_d .

Στα Σχ. 7.9 έως 7.13 φαίνεται η μεταβολή του αθροιστικού δείκτη μ_d συναρτήσει του λόγου του αντίστοιχου φορτίου $|V_i|$ προς την θεωρητική αντοχή της δοκού. Το κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε ίδιο τρόπο οπλίσεως. Χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συμβολισμοί για τα σημεία που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς λόγους διατμήσεως. Όπως φαίνεται απ' τα σημεία των διαγραμμάτων η συσχέτιση $|V_i/V_g| - \mu_d$ δεν δείχνει να διαφέρει σημαντικά για λόγους διατμήσεως $\alpha_s = 0.50-0.83$.

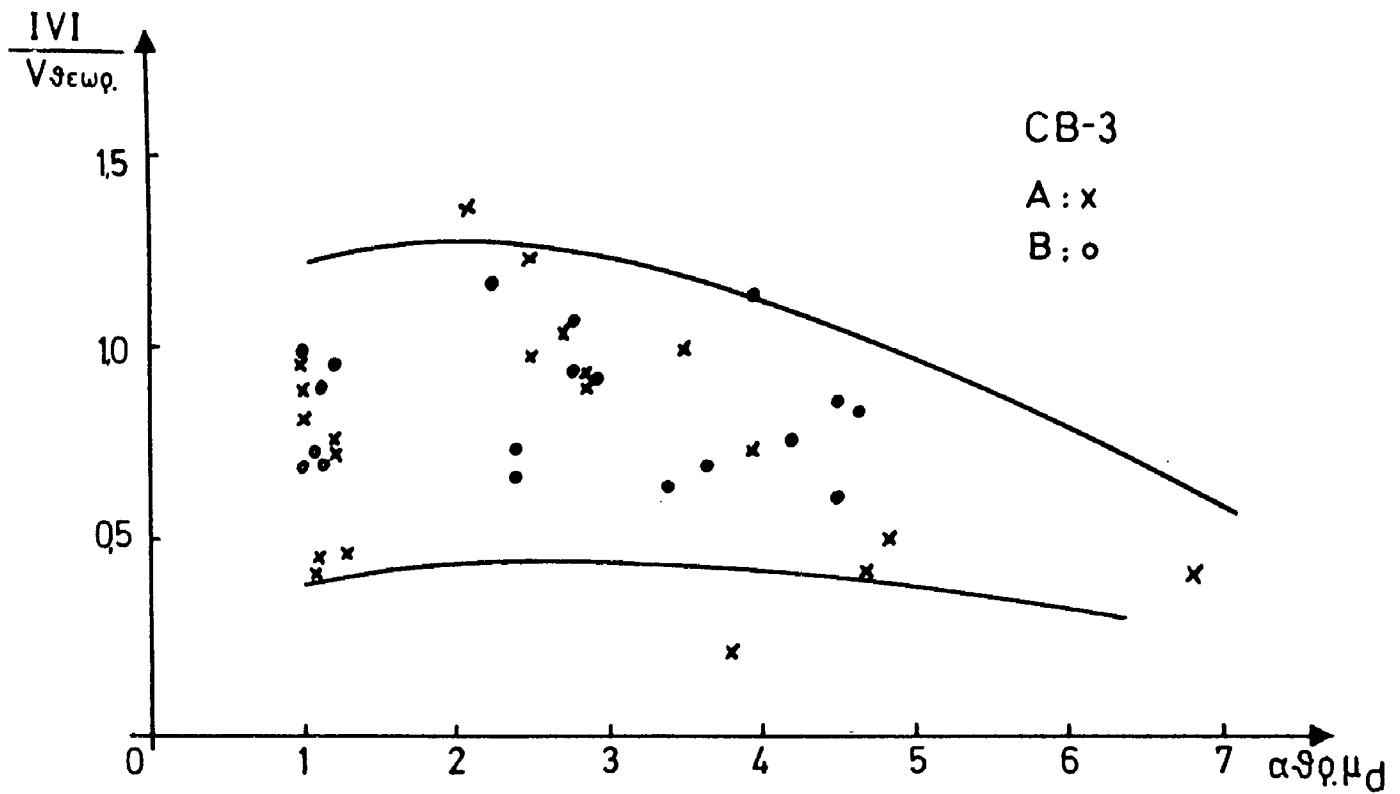
Στο Σχ. 7.14 παριστάνονται οι μέσες καμπύλες που προκύπτουν απ' τα Σχ. 7.9-7.13. Παρατηρούμε ότι η δοκός με τους διαγώνιους οπλισμούς συμπεριφέρεται καλύτερα, τόσο από άποψη αντοχών αλλά και δυνατότητας μετακινήσεων. Η δοκός με τους χιαστί οπλισμούς συμπεριφέρεται καλύτερα απ' την κλασικώς οπλισμένη, ενώ οι δοκοί με βλήτρα εμφανίζουν μεγάλη μείωση αποκρίσεως για μεγάλες τιμές μετακινήσεων.



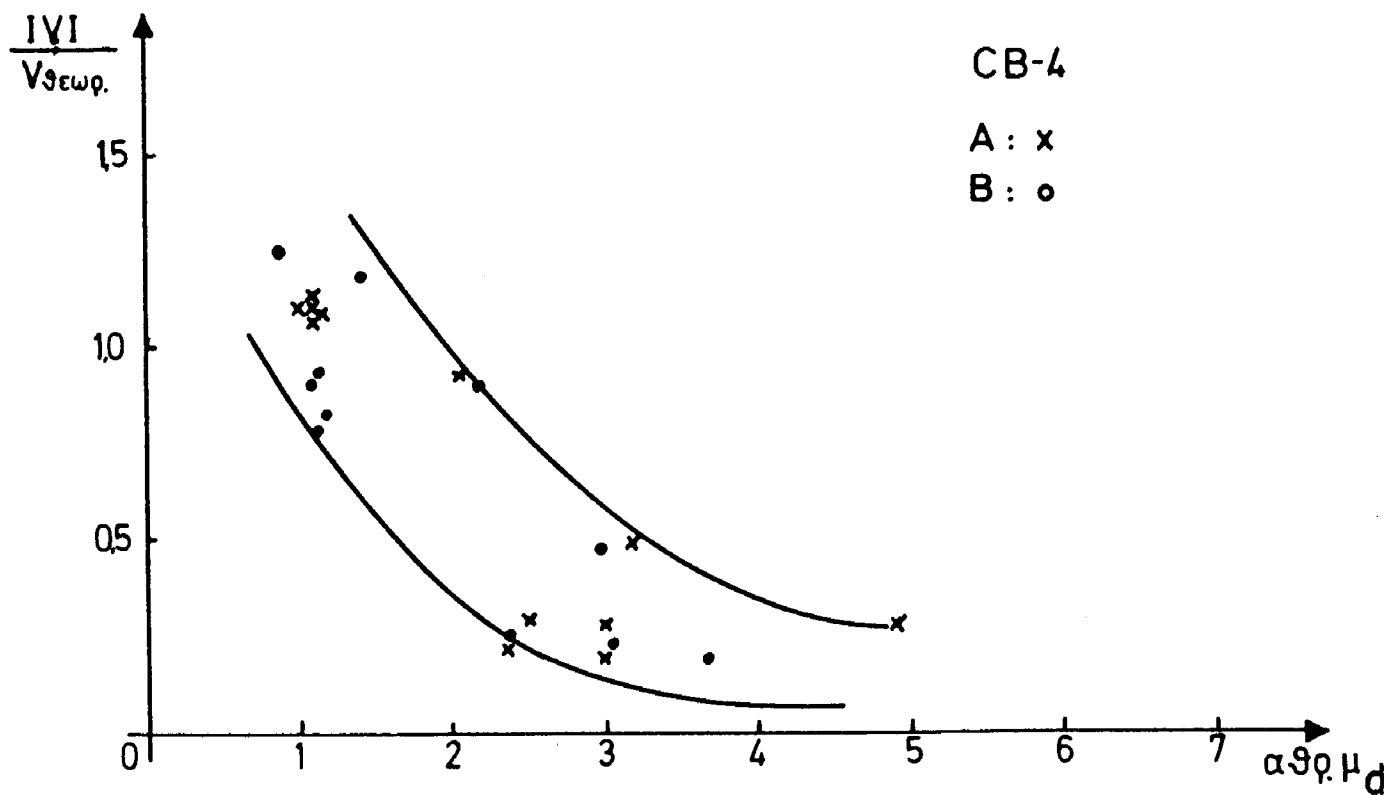
Σχ. 7.9 : CB-1. Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου.



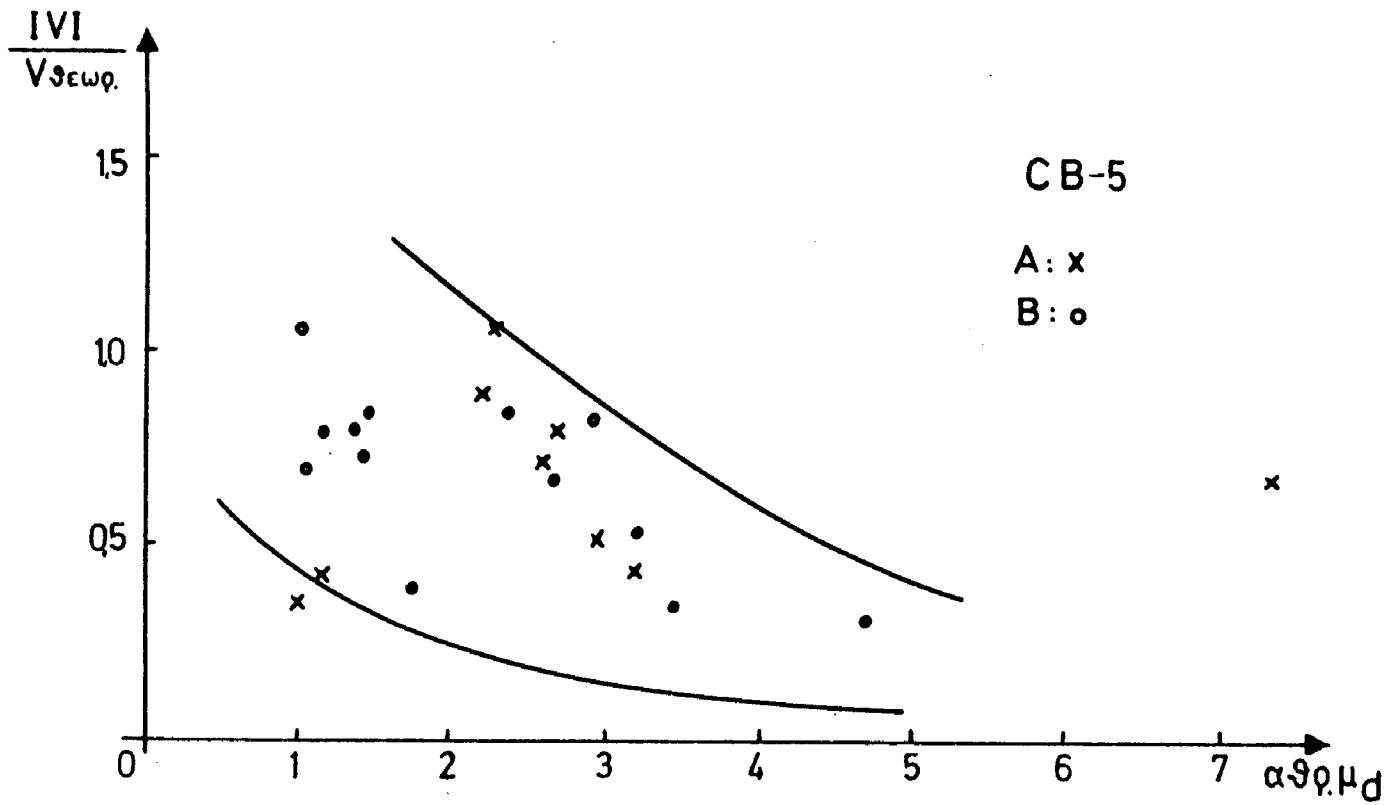
Σχ. 7.10 CB-2. Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου.



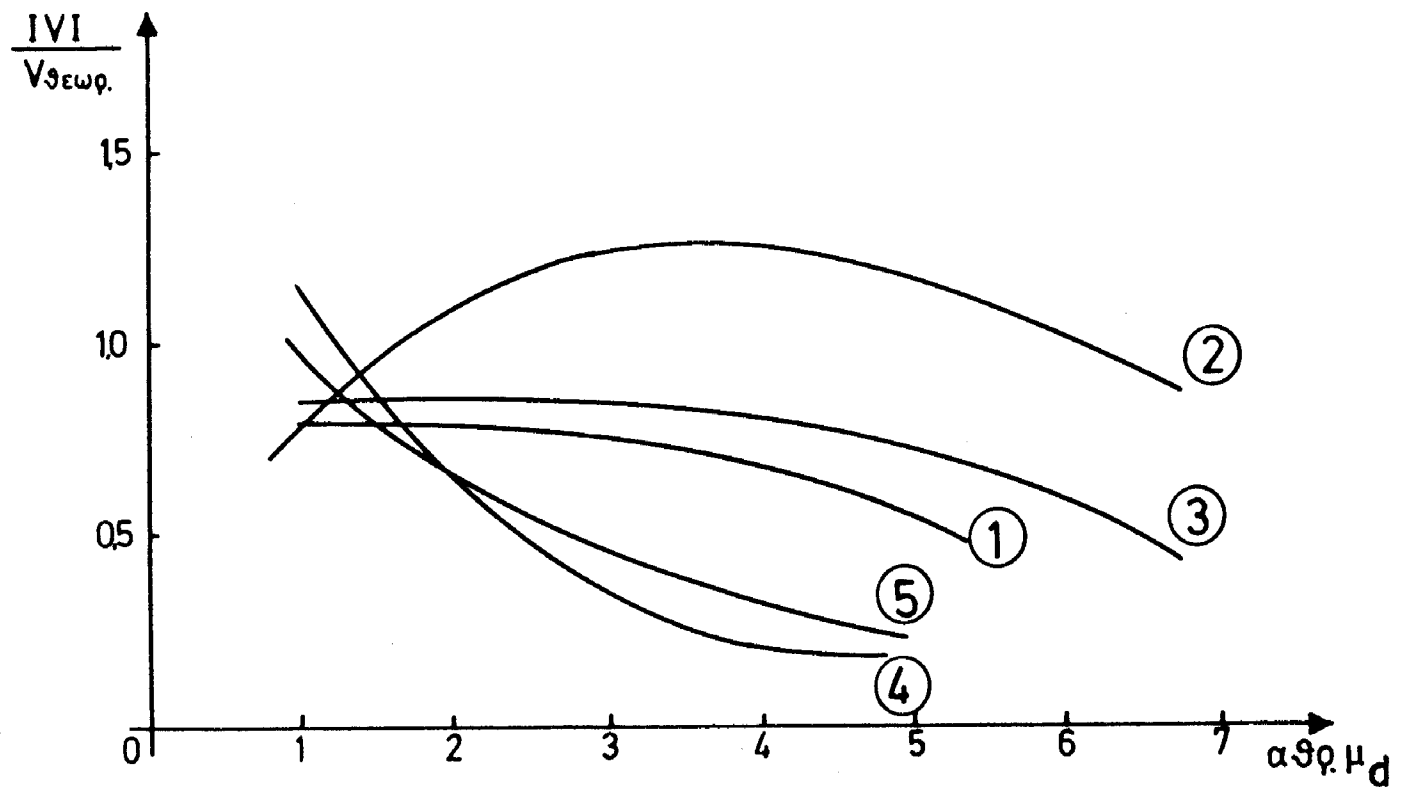
Σχ. 7.11: CB-3. Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου.



Σχ. 7.12: CB-4. Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου.



Σχ. 7.13: CB-5. Μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου.

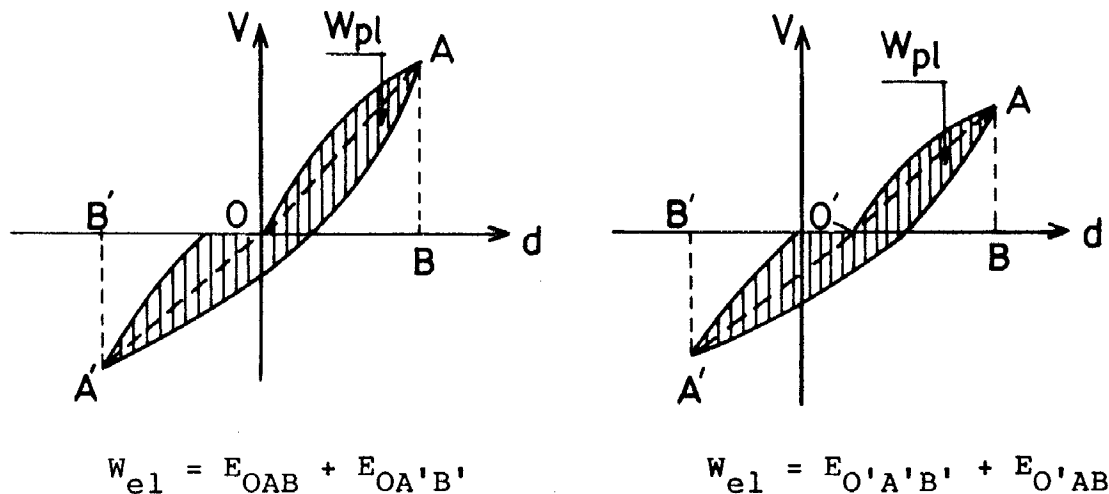


Σχ. 7.14: Μέση μεταβολή του δείκτη αθροιστικής πλαστιμότητας συναρτήσει του φορτίου, για τους 5 τρόπους σπέρσεως που εξετάστηκαν.

8. ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

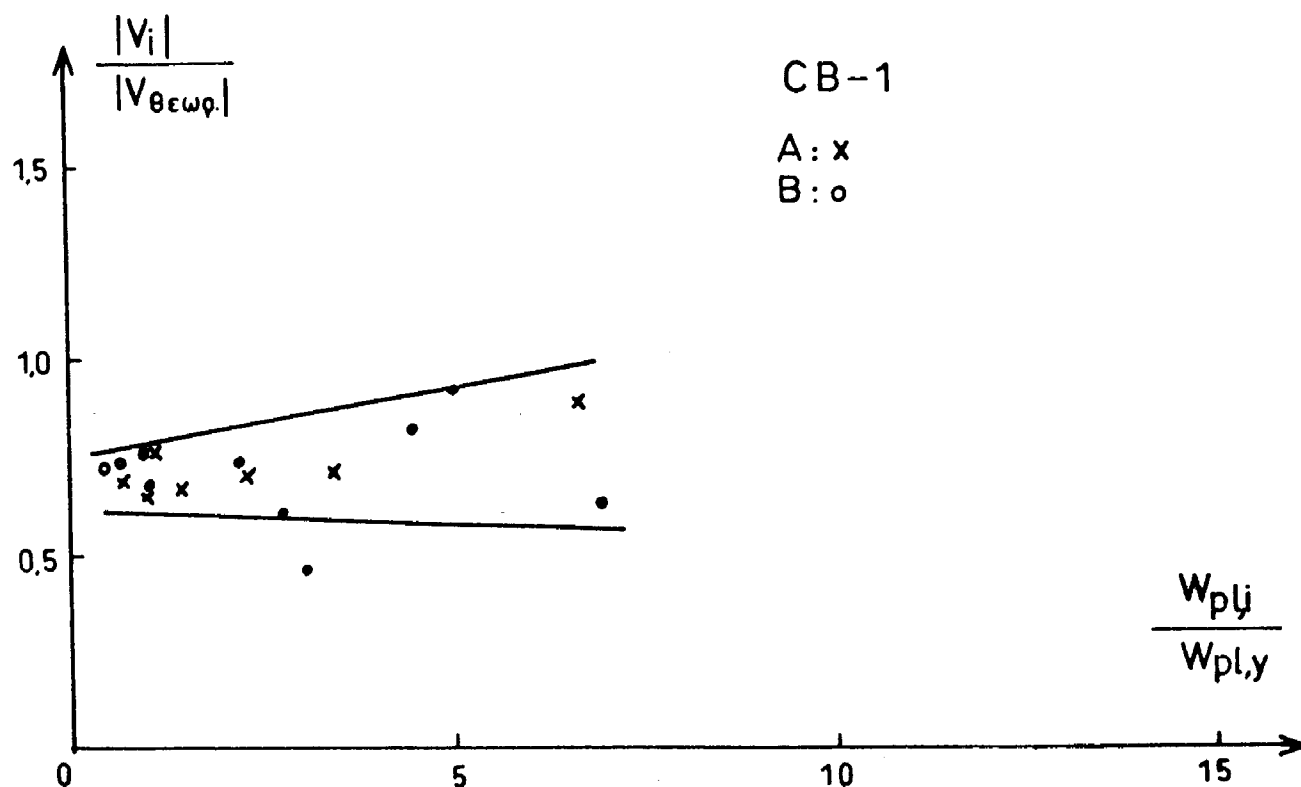
Η συνολικώς καταναλισκόμενη ενέργεια (dissipated energy) είναι ένα απ' τα πιο αξιόπιστα μεγέθη για την αποτίμηση της συμπεριφοράς μίας κατασκευής. Το μέγεθος αυτό εκφράζει καί τη μείωση αποκρίσεως καθώς καί τη μείωση ακαμψίας, παράγοντες που δεν είναι δυνατόν να ληφθούν ευθέως υπόψη στον υπολογισμό του δείκτη πλαστιμότητας.

Σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φορτίσεως η καταναλισκόμενη ενέργεια εκφράζεται απ' το εμβαδόν που περικλείεται απ' τους βρόχους υστερήσεως (βλ. Σχ. 8.1). Ονομάζεται και πλαστική ενέργεια W_{pl} διότι το σύστημα δεν μπορεί να την "αποδώσει" μετά τον μηδενισμό των επιβαλλομένων παραμορφώσεων.

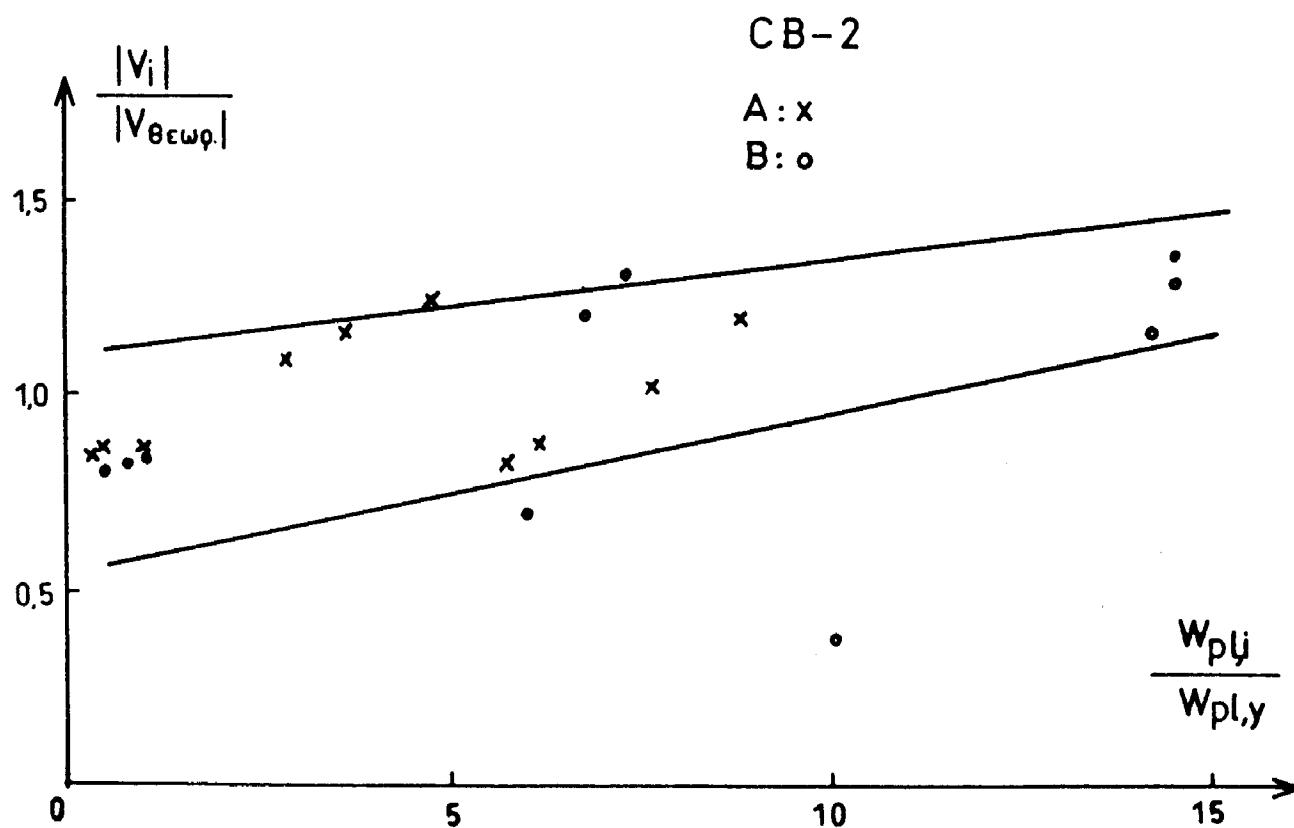


Σχ. 8.1: Καταναλισκόμενη Ενέργεια σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φορτίσεως.

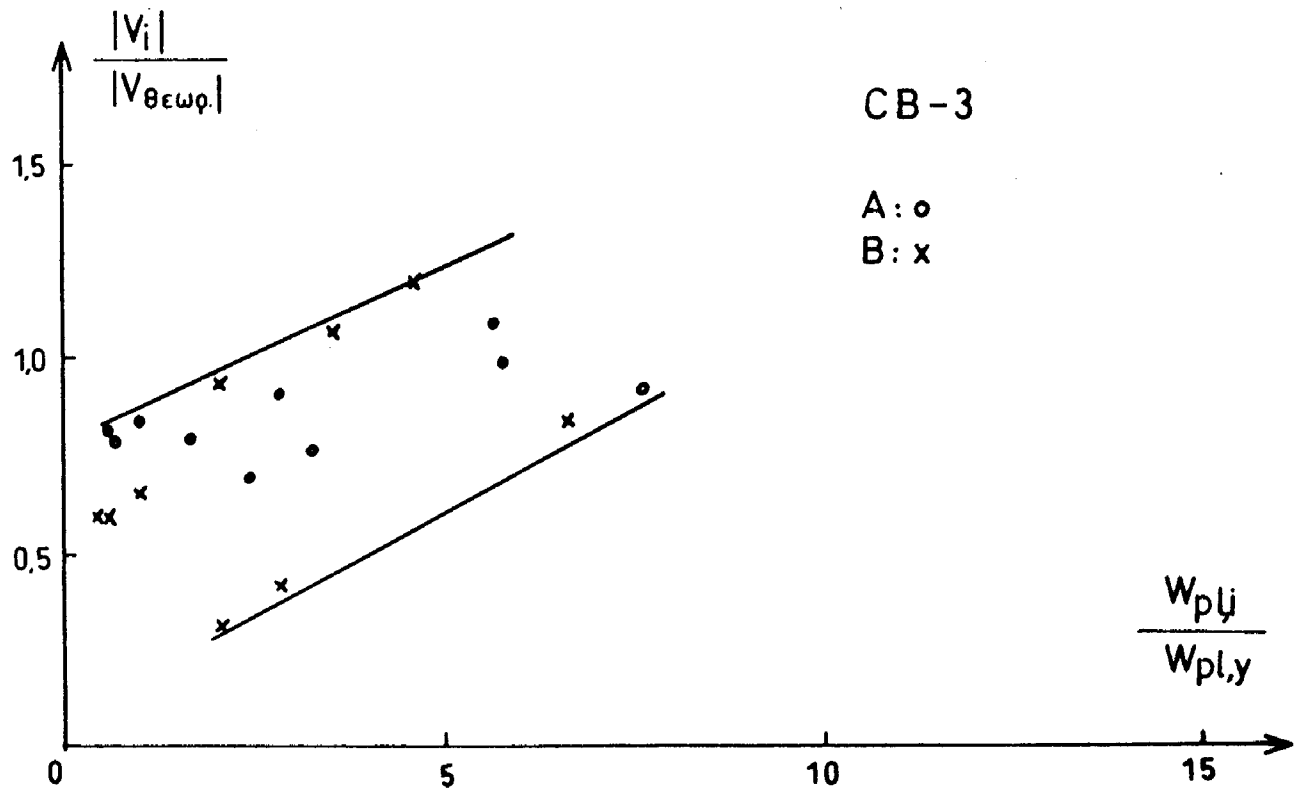
Στα Σχ. 8.2-8.6 για κάθε τρόπο οπλίσεως παριστάνεται ο λόγος της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε πλήρη κύκλο φορτίσεως $W_{pl,i}$ προς την καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τον πρώτο κύκλο διαρροής $W_{pl,y'}$ συναρτήσει του μέσου φορτίου $|\bar{V}_i|$ των δύο κατευθύνσεων φορτίσεως στον αντίστοιχο κύκλο. Τα πειραματικά σημεία στην κάθε περίπτωση βρίσκονται σε ένα διάστημα τιμών. Οι μέσες τιμές των διαγραμμάτων αυτών προσεγγίζονται με τις ευθείες που παριστάνονται στο Σχ. 8.7. Τα βελάνια υποδηλώνουν την αστοχία των δοκιμών.



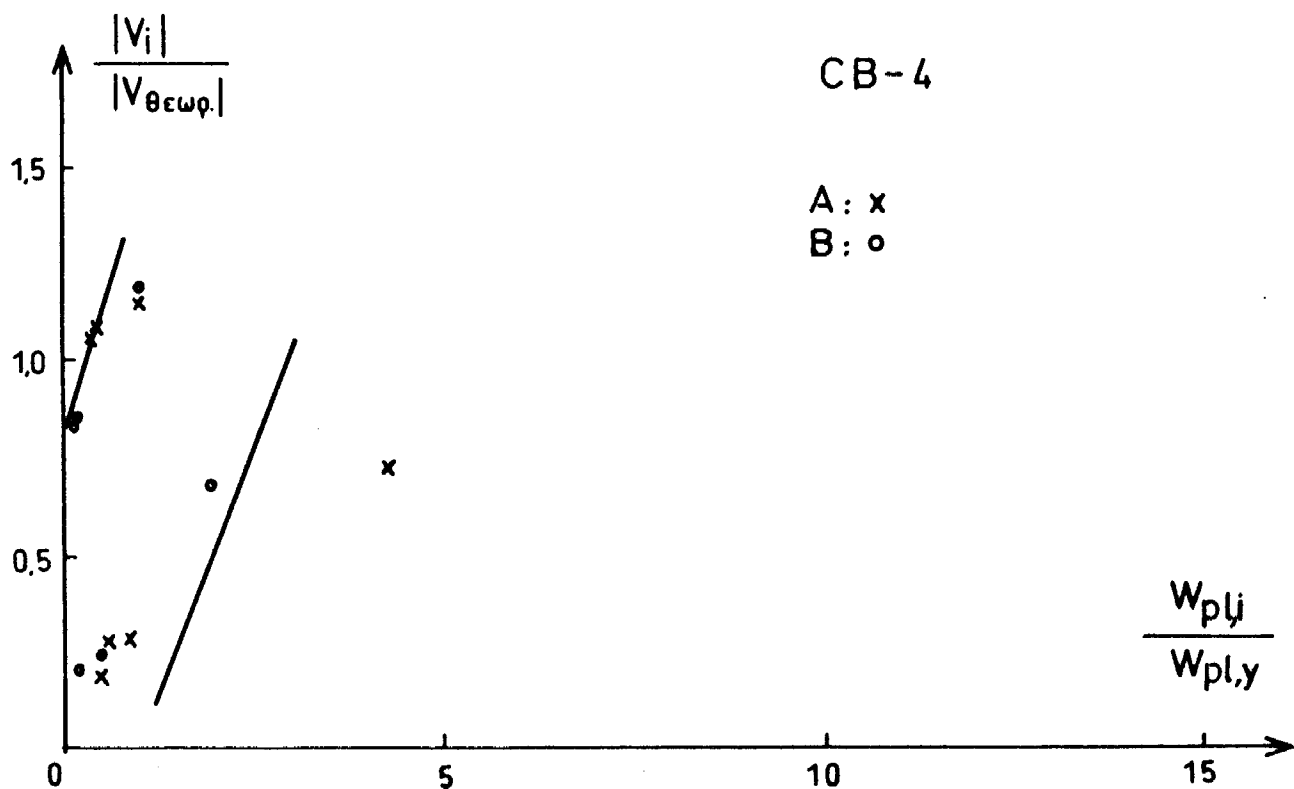
Σχ. 8.2: CB-1A,B - Μεταβολή του λόγου αναλίσκόμενης ενέργειας κατά τους πλήρεις κύκλους προς την ενέργεια του κύκλου διαρροής, συναρτήσει του φορτίου.



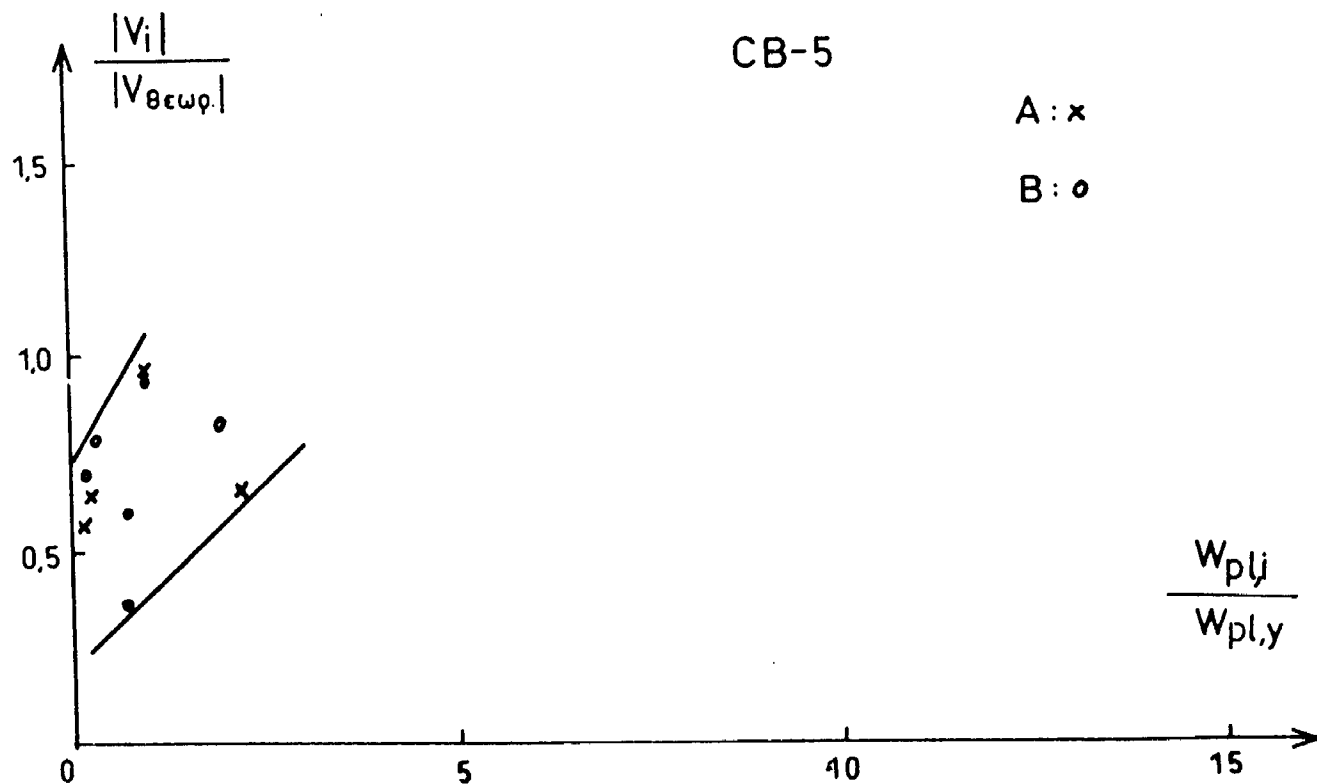
Σχ. 8.3: CB-2A,B - Αναλίσκόμενη ενέργεια πλήρων κύκλων συναρτήσει του φορτίου.



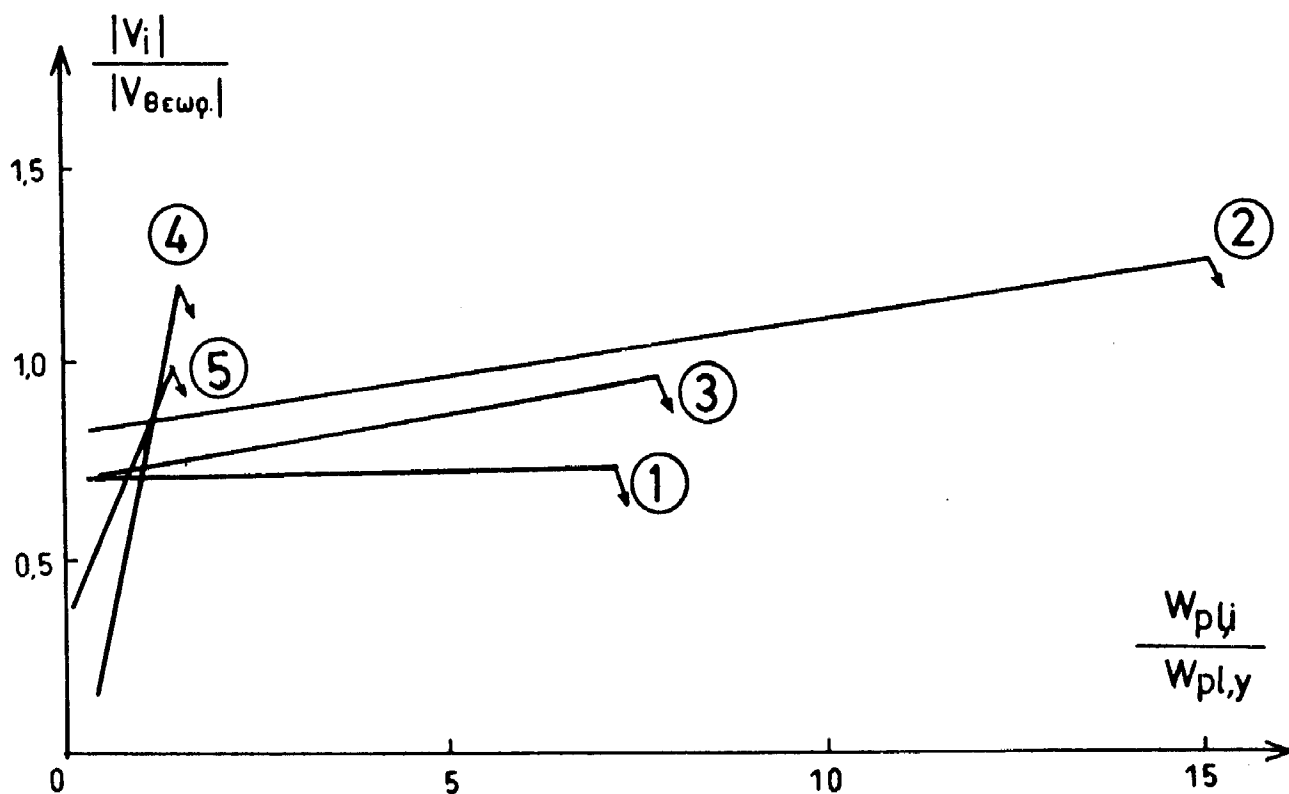
Σχ. 8.4: CB-3A,B - Αναλισκόμενη ενέργεια πλήρων κύκλων συναρτήσει του φορτίου.



Σχ. 8.5: CB-4A,B - Αναλισκόμενη ενέργεια πλήρων κύκλων συναρτήσει του φορτίου.



Σχ. 8.6: CB-5A,B - Αναλισκόμενη ενέργεια πλήρων κύκλων συναρτήσει του φορτίου.



Σχ. 8.7 Μεταβολή του λόγου αναλισκόμενης ενέργειας κατά τους πλήρεις κύκλους προς την ενέργεια του κύκλου διαρροής, συναρτήσει του φορτίου.

Οι δοκοί με τους δισδιαγώνιους οπλισμούς πάλι δείχνουν καλύτερη συμπεριφορά: απορροφούν ενέργεια ίση σχεδόν με 15 φορές την ενέργεια του πρώτου κύκλου (διαρροής) διατηρώντας μεγάλες τιμές αποκρίσεως. Μετά τις δοκούς αυτές συμπεριφέρονται καλύτεροι οι δοκοί με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα.

Η ιδιότυπη μορφή των διαγραμμάτων που αντιστοιχούν στην όπλιση με βλήτρα (CB-4,5) οφείλεται στο γεγονός ότι στα δοκίμια αυτά παρατηρείται μεγάλη μείωση της αποκρίσεως ενώ, ταυτοχρόνως η καταναλισκόμενη ενέργεια $W_{pl,y}$ στον κύκλο διαρροής είναι μεγάλη και συγκρίσιμη με τις $W_{pl,i}$ των επόμενων κύκλων (βλ. διαγρ. V-δ, Σχ. 3.4, 3.5). Έτσι προκύπτουν μικρές τιμές των λόγων $\bar{V}_i/V_{\theta\epsilon\omega\rho}$ και $W_{pl,i}/W_{pl,y}$.

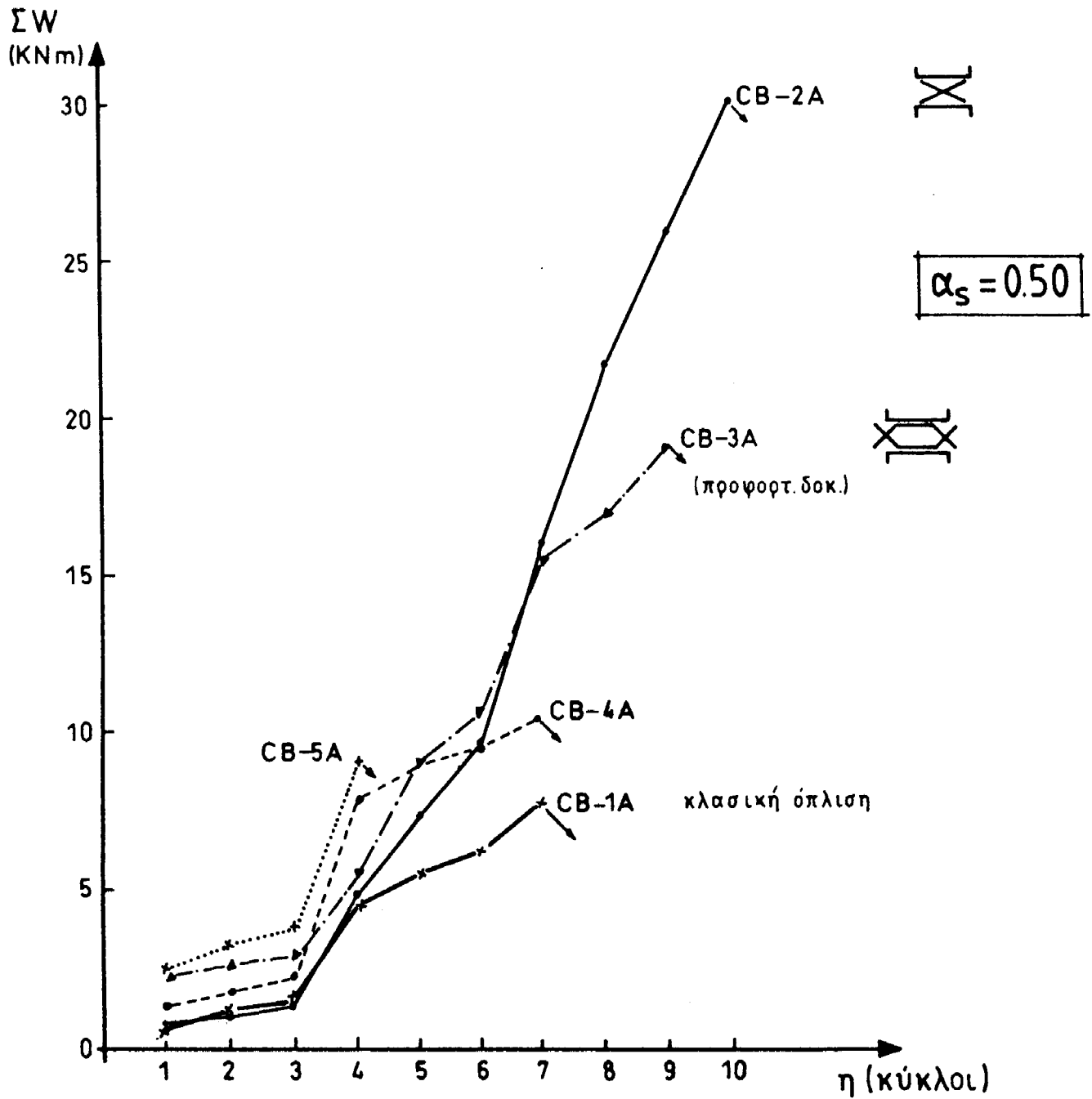
Στα Σχ. 8.8α,β φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αθροιστικής καταναλισκόμενης ενέργειας ΣW_{pl} κάθε δοκιμίου συναρτήσει του αριθμού n των πλήρων κύκλων φορτίσεως. Τα βελάνια στο τέλος των καμπυλών υποδηλώνουν την αστοχία των δοκιμών.

Στα Σχ. 8.9α,β παριστάνεται για κάθε δοκίμιο η μεταβολή της αθροιστικής καταναλισκόμενης ενέργειας ΣW_{pl} συναρτήσει του αθροίσματος των δεικτών αθροιστικής πλαστιμότητας $\Sigma \mu_d$. (Η έννοια του αθροιστικού δείκτη μ_d εξηγείται στην §7.3).

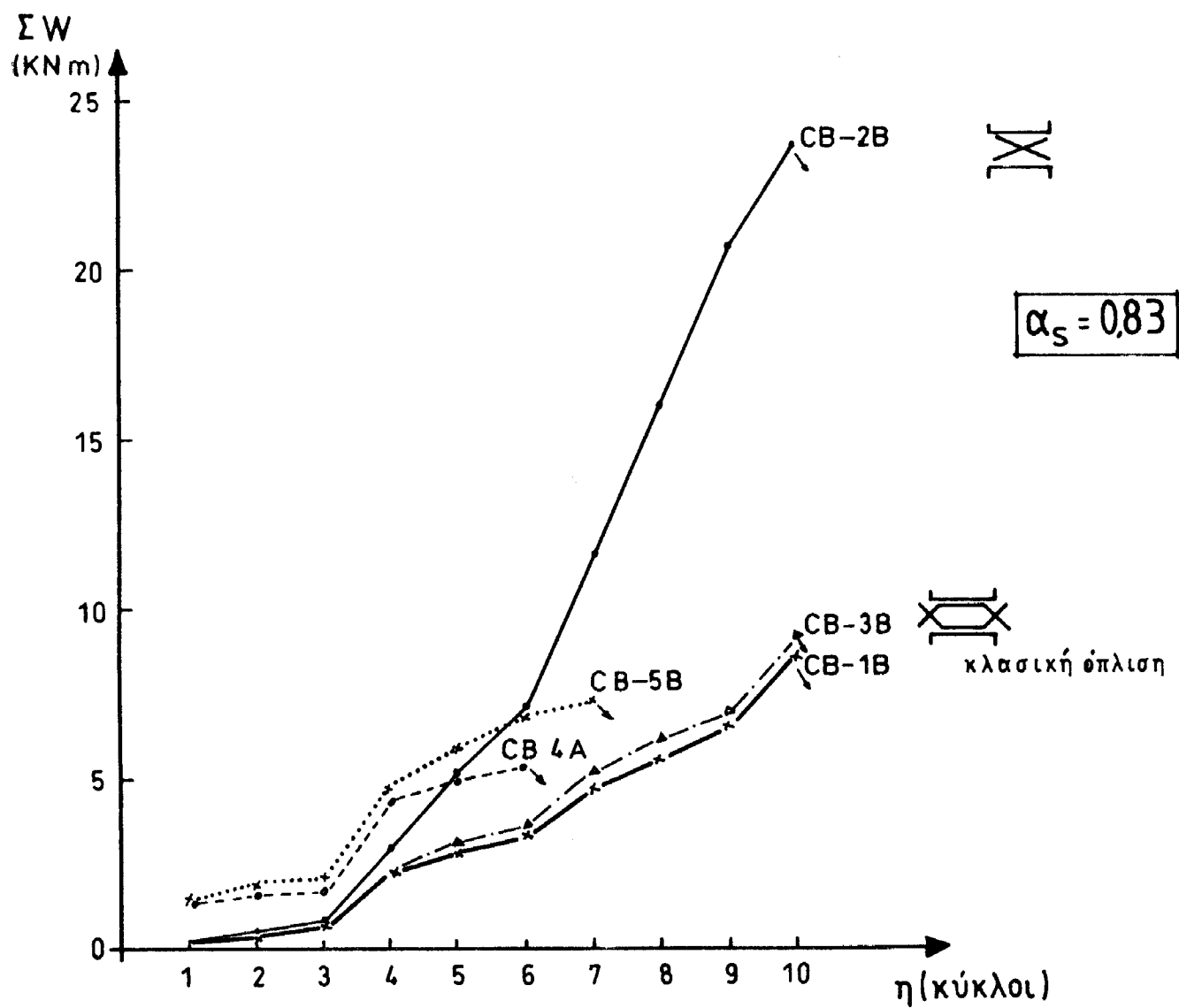
Τα διαγράμματα $\Sigma W_{pl}-n$ και $\Sigma W_{pl}-\Sigma \mu_d$ είναι ιδιαιτέρως ενδεικτικά της συμπεριφοράς των δοκιμών γιατί παρέχουν ταυτοχρόνως τη δυνατότητα συγκρίσεως της καταναλισκόμενης ενέργειας και της ικανότητας παραμορφώσεως του καθενός.

Απ' τα διαγράμματα αυτά ξεχωρίζουν πάλι τα δοκίμια με τους δισδιαγώνιους οπλισμούς (CB-2): απορροφούν το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας και έχουν τη μεγαλύτερη ικανότητα παραμορφώσεως ($\Sigma \mu_d, n$) απ' τα άλλα δοκίμια. Η καλύτερη συμπεριφορά των δοκιμών CB-2 αρχίζει να φαίνεται για μεγάλες στάθμες μετακινήσεων: για $n > 6$ ($\delta = 3\delta_y$) και $\Sigma \mu_d > 25$.

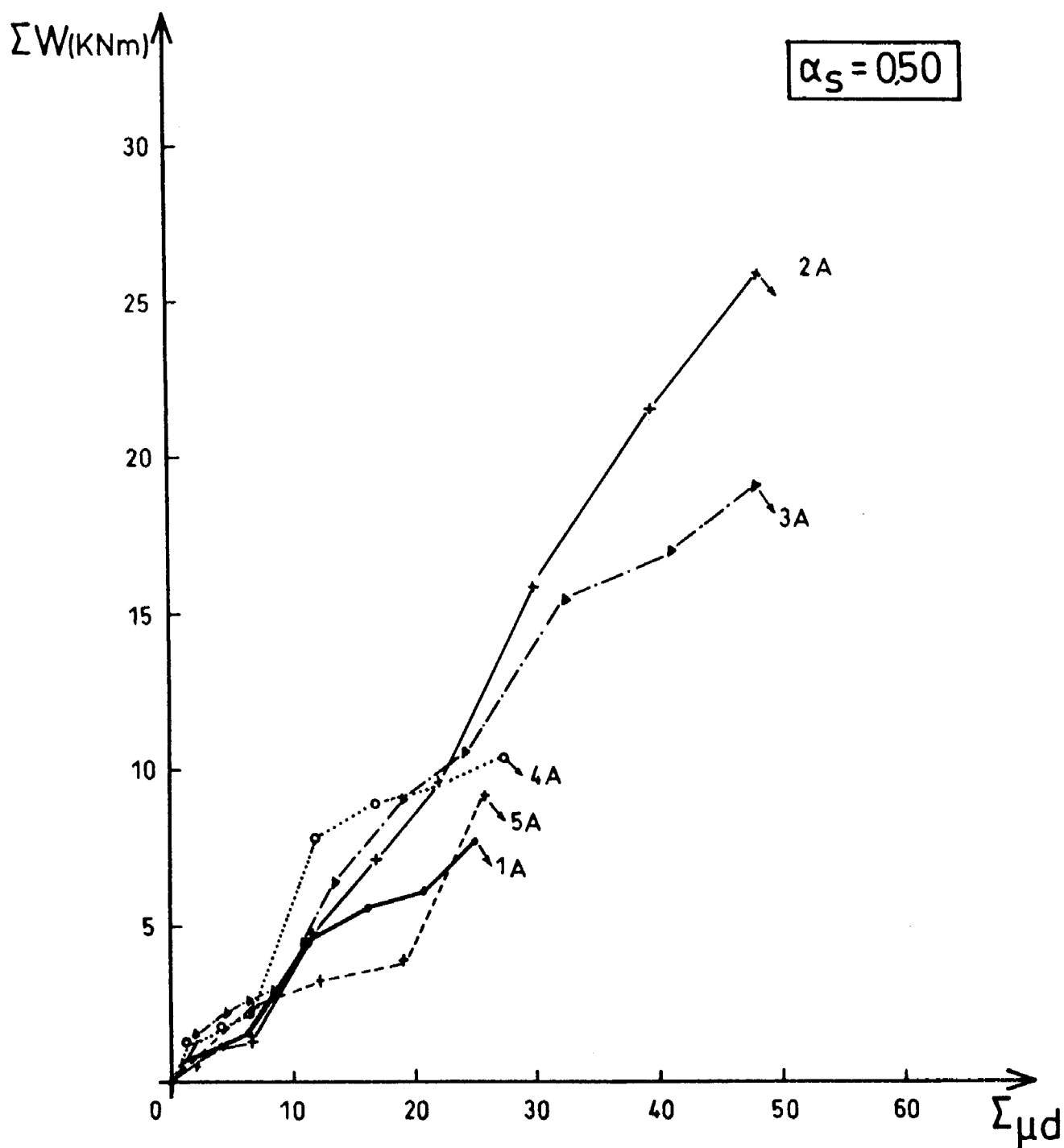
Μετά τις δοκούς με δισδιαγώνιους οπλισμούς την καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζουν τα δοκίμια με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα.



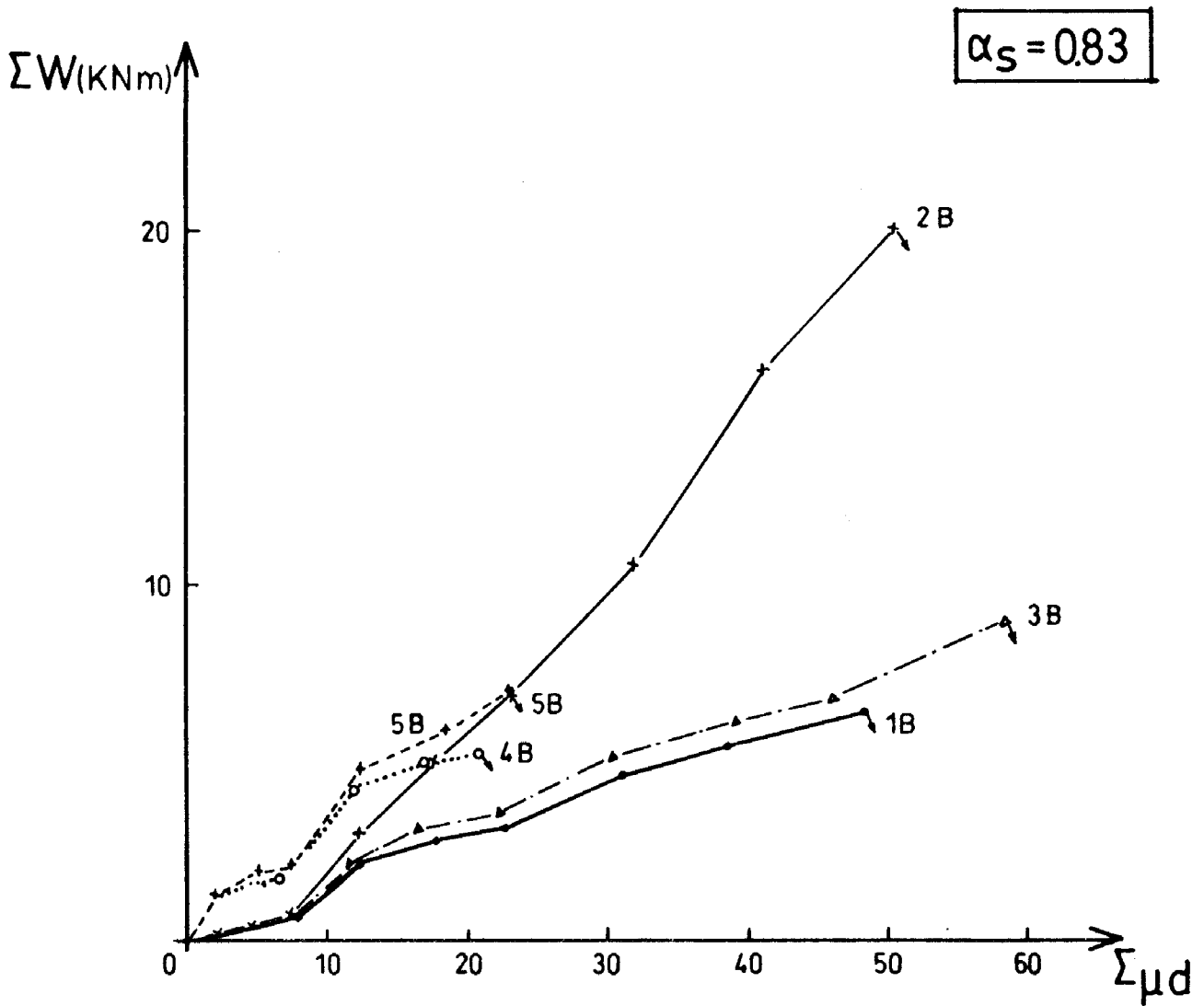
Σχ. 8.8α Μεταβολή της αθροιστικής αναλίσκόμενης ενέργειας συναρτήσει του αριθμού των κύκλων - $\alpha_s = 0.50$ -



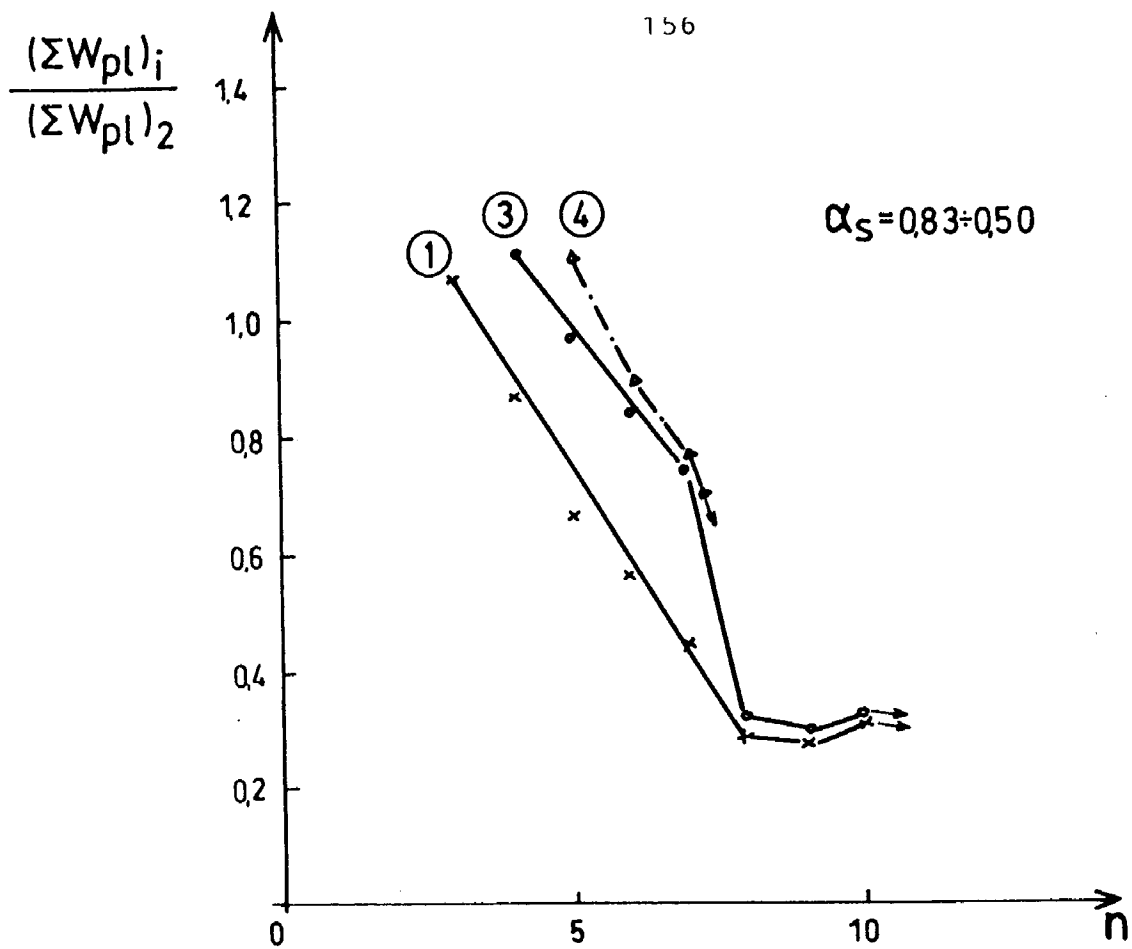
Σχ. 8.8β Μεταβολή της αθροιστικής αναλίσκόμενης ενέργειας συν-
ναρτήσει του αριθμού των κύκλων - $\alpha_s = 0.83$ -



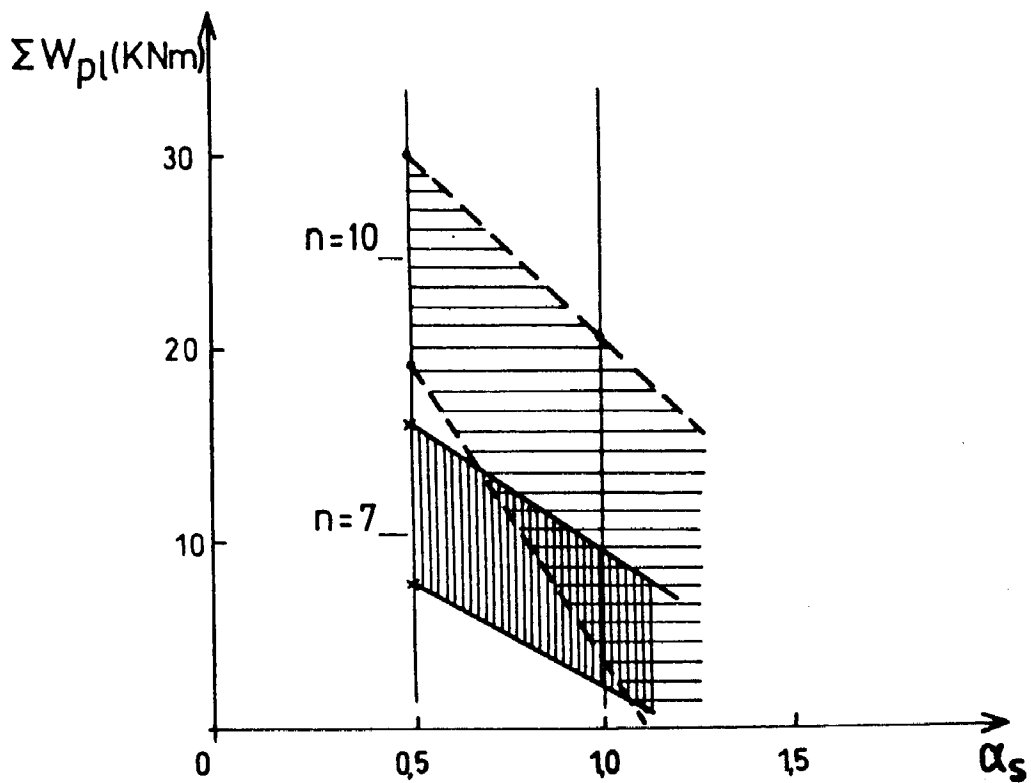
Σχ. 8.9α Μεταβολή της αθροιστικής αναλίσκόμενης ενέργειας συν-
ναρτήσει του αθροίσματος των δεικτών αθροιστικής πλα-
στιμότητας - $\alpha_s = 0.50$ -



Σχ. 8.9β Μεταβολή της αθροιστικής αναλυσκόμενης ενέργειας συναρτήσει του αθροίσματος των δεικτών αθροιστικής πλαστιμότητας - $\alpha_s = 0.83$ -



Σχ. 8.10 Συγκριτικώς με τον τρόπο οπλίσεως αρ. 2, οι κατά σειράν προτιμήσεως τρόποι αρ. 3, αρ. 1 και αρ. 4, οδηγούν σε συνεχώς μειούμενα ποσοστά αναλίσκόμενης ενέργειας συναρτήσει του αριθμού των κύκλων (γενικοί μέσοι όροι).



Σχ. 8.12 Συνολική αναλίσκόμενη ενέργεια συναρτήσει του λόγου διατμήσεως και του αριθμού των ανακυκλώσεων για τους τρόπους οπλίσεως που εξετάστηκαν.

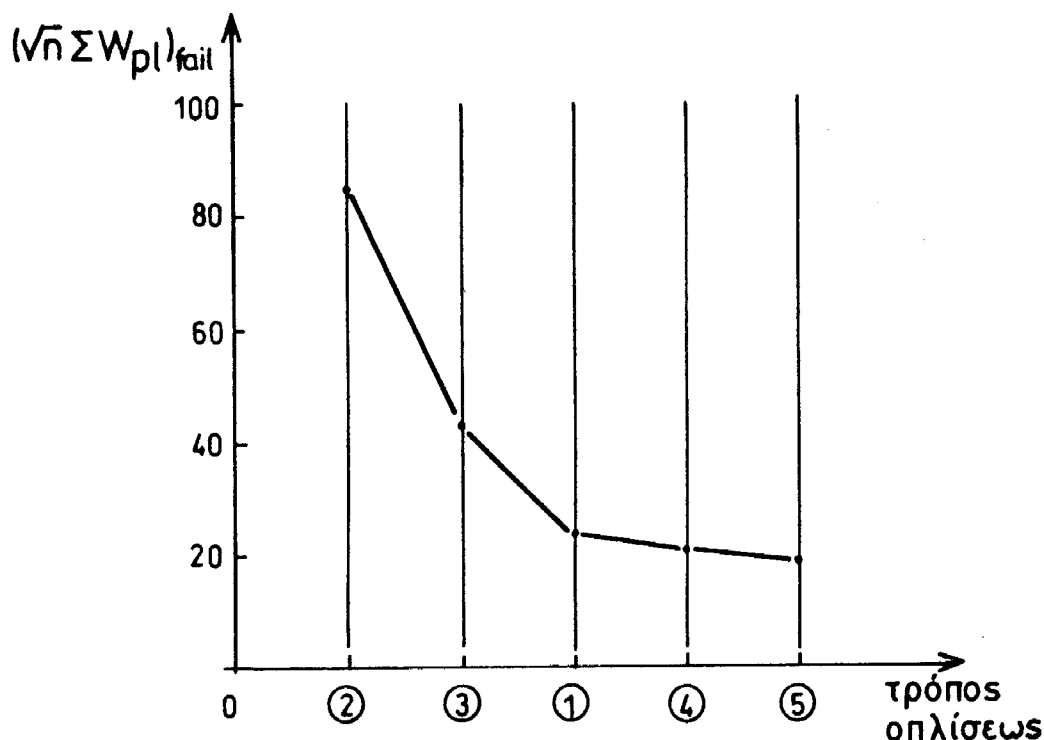
Τα δοκίμια με τα βλήτρα παρουσιάζουν αρχικώς μεγαλύτερη αθροιστική καταναλισκόμενη ενέργεια απ' τα άλλα δοκίμια, έχουν όμως μικρή ικανότητα παραμορφώσεως (μικρά n , $\Sigma \mu_d$). Επομένως η συνολική συμπεριφορά-τους δεν είναι ικανοποιητική.

Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε κι απ' τις καμπύλες του Σχ. 8.10, όπου παριστάνεται η μεταβολή του λόγου της αθροιστικής αναλισκόμενης ενέργειας $(\Sigma W_{pl})_1$ των δοκών CB-1,3,4 προς την αντιστοιχη ενέργεια $(\Sigma W_{pl})_2$ των διαγωνίως οπλισμένων δοκών, συναρτήσει του πλήθους n των ανακυκλώσεων.

Ετσι, το επιθυμητόν για την καλή συμπεριφορά των δοκών συζεύξεως είναι:

- κατανάλωση ενέργειας ΣW_{pl}
- σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερον αριθμό " n " κύκλων αυξουσών επιβαλλομένων παραμορφώσεων.

Αναζητείται λοιπόν ένα συνδυασμένο κριτήριο συμπεριφοράς, λ.χ. $(\sqrt{n} \Sigma W_{pl})_{fail}$ τη στιγμή της αστοχίας. Οι τιμές που προκύπτουν απ' το κριτήριο αυτό για τους πέντε τρόπους οπλίσεως που εξετάστηκαν (μ.ο. δοκιμών Α, Β) παριστάνονται στο Σχ. 8.11.



Σχ. 8.11: Συνδυασμένο κριτήριο $(\Sigma W_{pl,n})$ της συμπεριφοράς των δοκών συζεύξεως τη στιγμή της αστοχίας.

Στο Σχ. 8.12 παριστάνεται η μεταβολή της συνολικής αναλίσκόμενης ενέργειας ΣW_{pl} συναρτήσει των α_s , n για όλους τους τρόπους οπλίσεως που εξετάστηκαν. Η συνολική ενέργεια ΣW_{pl} μειώνεται με την αύξηση του λόγου διατμήσεως, γεγονός που εκ πρώτης όψεως φαίνεται παράδοξο και το οποίο χρήζει περαιτέρω διερευνήσεως.

Πρέπει ακόμη να παρατηρηθεί ότι η τιμή του λόγου διατμήσεως φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκών με κλασική όπλιση:

Για $\alpha_s = 0.50$ η δοκός CB-1A εμφανίζει τη χειρότερη συμπεριφορά απ'όλες τις άλλες δοκούς (βλ. Σχ. 8.8α, 8.9α): $n = 7$, $\Sigma \mu_d = 25$ και: $\Sigma W_{pl} (CB-1A) \approx 0.50 \Sigma W_{pl} (CB-3A) \approx 0.25 \Sigma W_{pl} (CB-2A)$.

Για τον λόγο $\alpha_s = 0.83$ (βλ. Σχ. 8.8β, 8.9β) η κλασικώς οπλισμένη δοκός CB-1B ($n = 10$, $\Sigma \mu_d = 60$) συμπεριφέρεται παρόμοια με τη δοκό CB-3B με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα. Είναι: $\Sigma W_{pl} (CB-1B) \approx \Sigma W_{pl} (CB-3B) \approx 0.35 \Sigma W_{pl} (CB-2B)$.

Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η όπλιση με χιαστί οπλισμούς στα άκρα βελτιώνει θεαματικά τη συμπεριφορά των δοκών συζεύξεως συγκριτικά με τον κλασικό τρόπο οπλίσεως, μόνον στην περίπτωση του μικρού λόγου διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$. Το γεγονός αυτό έχει ήδη επισημανθεί και κατά τον σχολιασμό της μορφολογίας ρηγματώσεως των δοκιμών (πρβλ. §4.2.5).

Απ'όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, φαίνεται επίσης ότι και η βελτίωση της συμπεριφοράς των διαγωνίως οπλισμένων δοκών, συγκριτικά με εκείνη των κλασικώς οπλισμένων δοκών, είναι σημαντικότερη στην περίπτωση του λόγου διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$.

Αυτό οφείλεται, ίσως, στο γεγονός ότι με την αύξηση του λόγου διατμήσεως, για την ανάληψη της τέμνουσας ενεργοποιείται περισσότερο ο μηχανισμός του δικτυώματος απ'ότι ο μηχανισμός του διαγώνιου θλιπτήρα (πρβλ. §4, μορφολογία ρηγματώσεως). Έτσι, για μεγαλύτερους λόγους διατμήσεως η κλασικώς οπλισμένη δοκός συμπεριφέρεται πιο ικανοποιητικά και οι εναλλακτικοί τρόποι οπλίσεως χάνουν την σχετική υπεροχή-τους.

Στο Σχ. 8.12 παριστάνεται η μεταβολή της συνολικής αναλίσκουμένης ενέργειας ΣW_{pl} συναρτήσει των α_s , n για όλους τους τρόπους οπλίσεως που εξετάστηκαν. Η συνολική ενέργεια ΣW_{pl} μειώνεται με την αύξηση του λόγου διατμήσεως, γεγονός που εκ πρώτης όψεως φαίνεται παράδοξο και το οποίο χρήζει περαιτέρω διερευνήσεως.

Πρέπει ακόμη να παρατηρηθεί ότι η τιμή του λόγου διατμήσεως φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκών με κλασική όπλιση:

Για $\alpha_s = 0.50$ η δοκός CB-1A εμφανίζει τη χειρότερη συμπεριφορά απ'όλες τις άλλες δοκούς (βλ. Σχ. 8.8α, 8.9α): $n = 7$, $\Sigma \mu_d = 25$ και: $\Sigma W_{pl} (CB-1A) \approx 0.50 \Sigma W_{pl} (CB-3A) \approx 0.25 \Sigma W_{pl} (CB-2A)$.

Για τον λόγο $\alpha_s = 0.83$ (βλ. Σχ. 8.8β, 8.9β) η κλασικώς οπλισμένη δοκός CB-1B ($n = 10$, $\Sigma \mu_d = 60$) συμπεριφέρεται παρόμοια με τη δοκό CB-3B με τους χιαστί οπλισμούς στα άκρα. Είναι: $\Sigma W_{pl} (CB-1B) \approx \Sigma W_{pl} (CB-3B) \approx 0.35 \Sigma W_{pl} (CB-2B)$.

Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η όπλιση με χιαστί οπλισμούς στα άκρα βελτιώνει θεαματικά τη συμπεριφορά των δοκών συζεύξεως συγκριτικά με τον κλασικό τρόπο οπλίσεως, μόνον στην περίπτωση του μικρού λόγου διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$. Το γεγονός αυτό έχει ήδη επισημανθεί και κατά τον σχολιασμό της μορφολογίας ρηγματώσεως των δοκιμών (πρβλ. §4.2.5).

Απ'όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, φαίνεται επίσης ότι και η βελτίωση της συμπεριφοράς των διαγωνίως οπλισμένων δοκών, συγκριτικά με εκείνη των κλασικώς οπλισμένων δοκών, είναι σημαντικότερη στην περίπτωση του λόγου διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$.

Αυτό οφείλεται, ίσως, στο γεγονός ότι με την αύξηση του λόγου διατμήσεως, για την ανάληψη της τέμνουσας ενεργοποιείται περισσότερο ο μηχανισμός του δικτυώματος απ'ότι ο μηχανισμός του διαγώνιου θλιπτήρα (πρβλ. §4, μορφολογία ρηγματώσεως). Έτσι, για μεγαλύτερους λόγους διατμήσεως η κλασικώς οπλισμένη δοκός συμπεριφέρεται πιο ικανοποιητικά και οι εναλλακτικοί τρόποι οπλίσεως χάνουν την σχετική υπεροχή-τους.

9. ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Η ανηγμένη απόσβεση ενός συστήματος που υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι $\zeta(\%) = W_{pl}/W_{el} \cdot 1/4\pi$, όπου οι W_{pl}, W_{el} ορίζονται όπως στο Σχ. 8.1.

Η μεταβολή της αποσβέσεως $\zeta(\%)$ των δοκών συζεύξεως που εξετάστηκαν, συναρτήσει του αριθμού n των κύκλων φορτίσεως, φαίνεται στα Σχ. 9.1α,β.

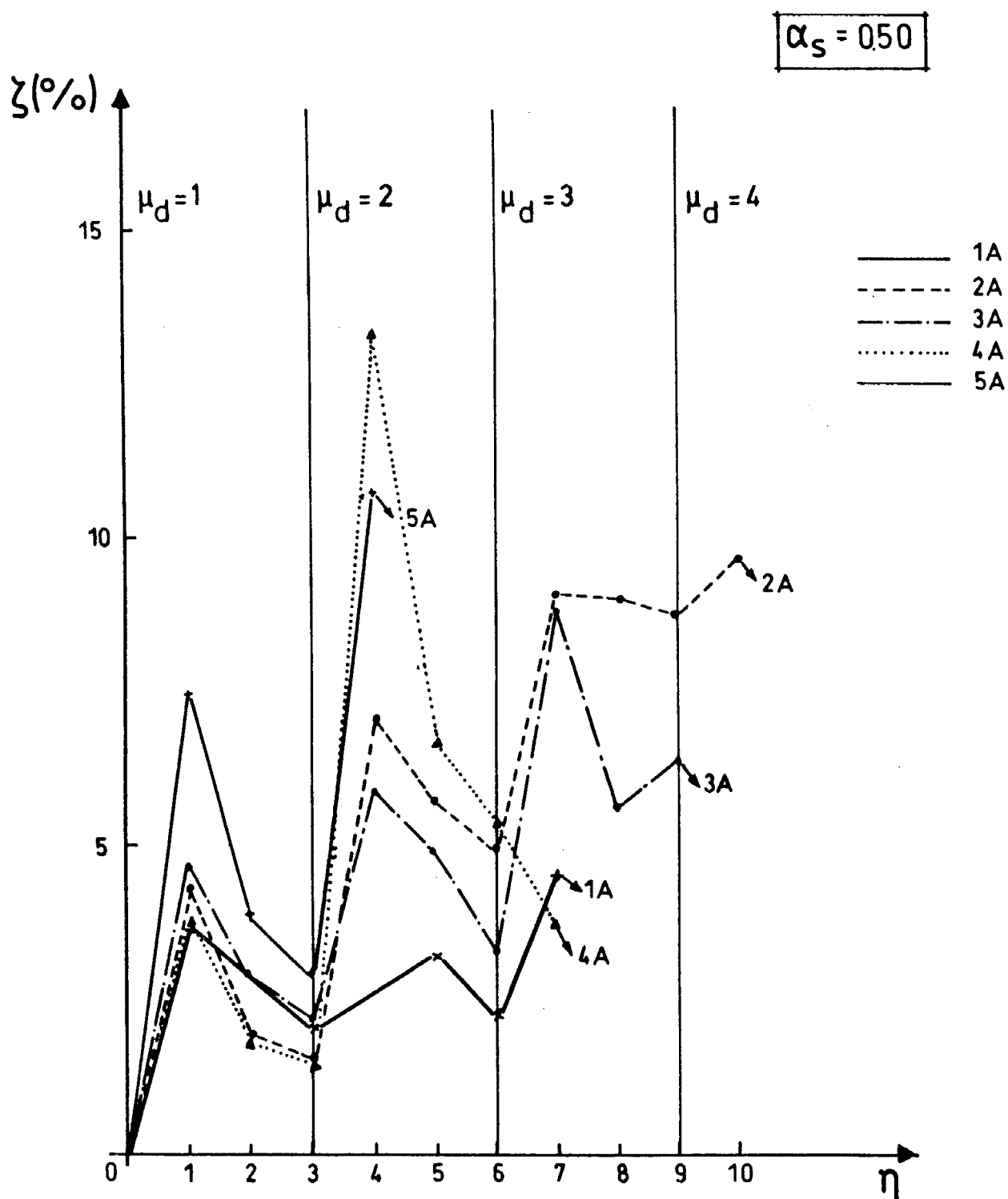
Στα Σχ. 9.2α,β παριστάνεται η μεταβολή της αθροιστικής αποσβέσεως $\Sigma\zeta(\%)$ συναρτήσει του αθροίσματος $\Sigma\mu_d$ των αθροιστικών δεικτών μ_d (πρβλ. §7.3).

Τα δοκίμια CB-2 με δισδιαγώνιο οπλισμό εμφανίζουν τη μεγαλύτερη απόσβεση, ιδίως για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις $n \geq 7$ ($\delta = 3\delta_y$). Επιπλέον, οι δοκοί αυτές δεν εμφανίζουν απότομες μειώσεις της αποσβέσεως για ανακυκλίσεις σε σταθερή στάθμη επιβαλλόμενων μετακινήσεων, όπως συμβαίνει με τις δοκούς που είναι οπλισμένες με βλήτρα: CB-4,5 (βλ. Σχ. 9.1α,β).

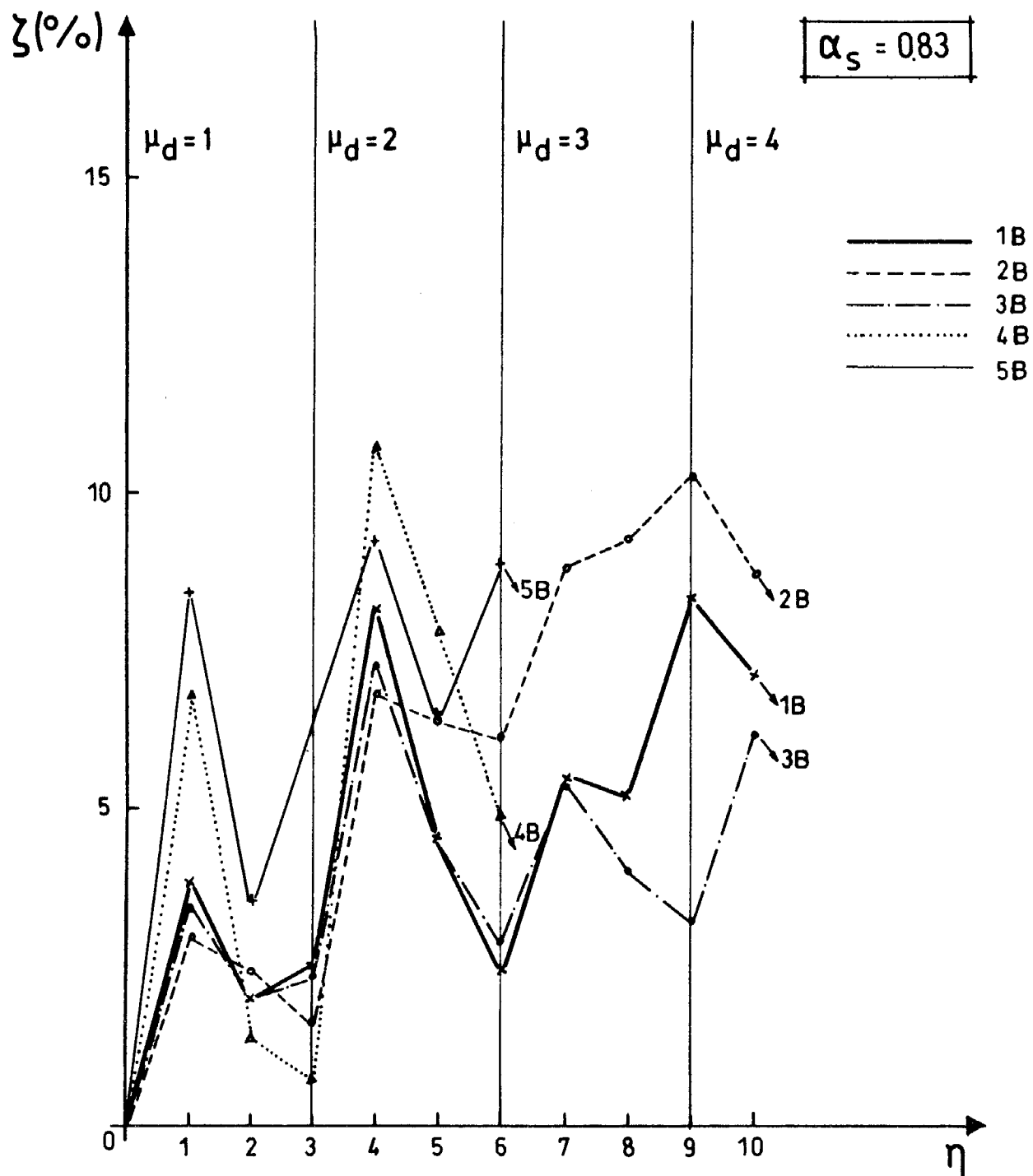
Όπως είχε επισημανθεί κατά την εξέταση της καταναλισκόμενης ενέργειας (πρβλ. §8), καί στις αποσβέσεις η διαφορά ανάμεσα στη συμπεριφορά της κλασικώς οπλισμένης δοκού και των δοκών με δισδιαγώνιους ή με χιαστί οπλισμούς είναι πολύ εντονότερη για λόγο διατμήσεως $\alpha_s = 0.50$ απ'ότι για $\alpha_s = 0.83$.

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι για μεγάλες στάθμες επιβαλλόμενων μετακινήσεων $n > 6$ ($\delta = 3\delta_y$) και $\Sigma\mu_d > 25$ τα δοκίμια CB-2 δεν εμφανίζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην απόσβεση συγκριτικώς με τα υπόλοιπα, πράγμα που είχε συμβεί στην περίπτωση καταναλισκόμενης ενέργειας (πρβλ. Σχ. 8.8, 8.9). Αυτό συμβαίνει διότι τα διαγωνίως οπλισμένα στοιχεία, για μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, διατηρούν μεγάλη τιμή αποκρίσεως V , έχουν έτσι μεγάλη ελαστική ενέργεια W_{el} . Ενώ τα άλλα δοκίμια για μεγάλες μετακινήσεις έχουν μικρή απόκριση, επομένως μικρή W_{el} που οδηγεί σε αυξημένες τιμές $\zeta\%$ συγκριτικώς με τα δοκίμια με δισδιαγώνιο οπλισμό.

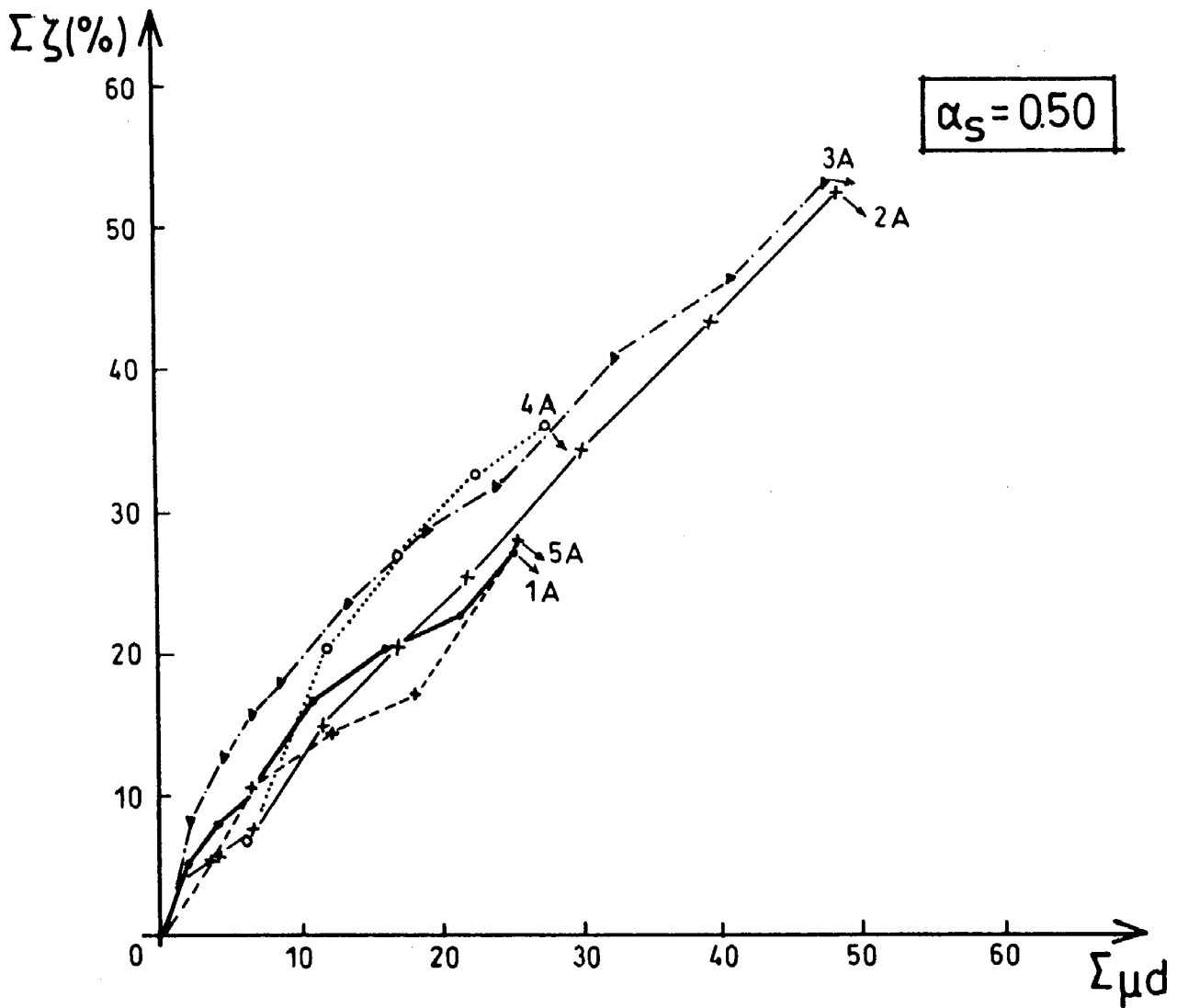
Ετσι, μόνη η ανηγμένη απόσβεση $\zeta(\%)$ δεν είναι τόσο ενδεικτική της πραγματικής συμπεριφοράς των δοκών συζεύξεως χωρίς τη σύγχρονη χρήση ενός κριτηρίου πλαστιμότητας.



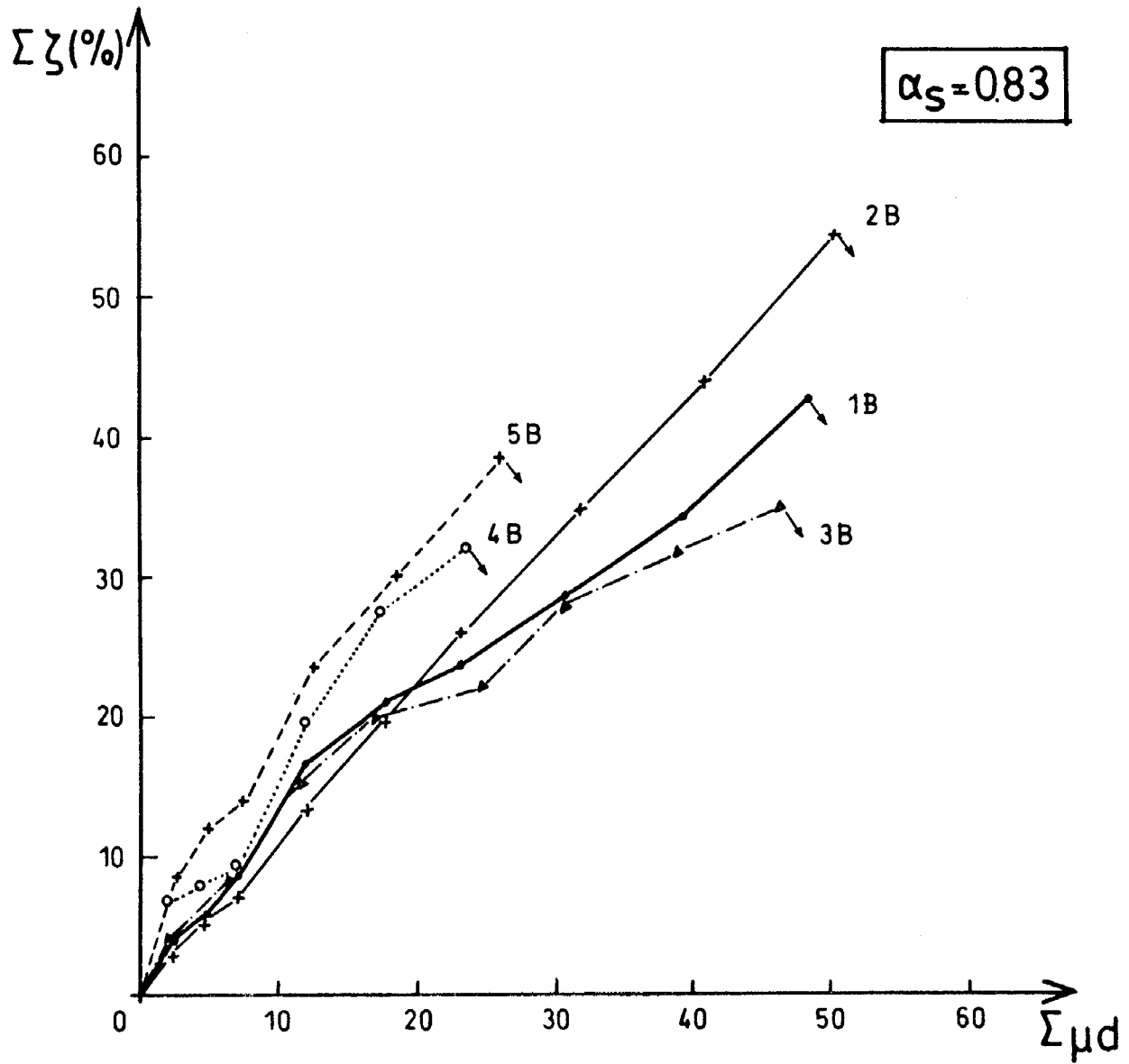
Σχ. 9.1α Μεταβολή της ανηγμένης αποσβέσεως συναρτήσει του αριθμού των κύκλων - $\alpha_s = 0.50$. -



Σχ. 9.1β Μεταβολή της ανηγμένης αποσβέσεως συναρτήσει του αριθμού των κύκλων - $\alpha_S = 0.83$ -



Σχ. 9.2α: Μεταβολή της αθροιστικής ανοιγμένης αποσβέσεως συναρτήσει του αθροίσματος των δεικτών αθροιστικής πλαστιμότητας - $\alpha_s = 0.50$ -



Σχ. 9.2β: Μεταβολή της αθροιστικής ανοιγμένης απορρόφησης συναρτήσει του αθροίσματος των δεικτών αθροιστικής πλαστικότητας - $\alpha_s = 0.83$ -